SCIENCES ET AVENIR

UNE COMÈTE INTERSTELLAIRE S'APPROCHE !

p.26

LA SCIENCE peut-elle SAUVER LE CLIMAT ?

p.38

SCIENCES ET AVENIR - N° 945 - NOVEMBRE 2025 - LA SCIENCE PEUT-ELLE SAUVER LE CLIMAT ?

NOVEMBRE 2025 - N° 945 - BEL 5,70€ - LUX 5,70€ - CH 9,50CHF - D 7,40€ - IT 5,70€ - ESP 5,70€ - GR 5,70€ - PORT-CONT 5,70€ - DOM 5,90€ - NCAL 800XPF - MAR 55MAD - TUN 11TND - CAN 8.20$CAD

L 13418 - 945 S - F: 5,30 € - RD

©ACINQUANTADUE/SHUTTERSTOCK PHOTOMONTAGE SETA - V.SADOVSKIS/HUTTERSTOCK

Chassez l'horizon.

*Autonomie maximale de 713 km, selon norme WLTP (valeurs au 05/12/2024). L'autonomie dépend de nombreux paramètres. **Pour une Audi A6 Avant e-tron : consommation électrique mixte (kWh /100 km) : 14,6 min - 17,5 max ; rejets de CO_2 en phase de roulage (g/km) : 0 (WLTP).** Valeurs au 19/06/2025, susceptibles d'évolution. SAS Volkswagen Group France, RCS Soissons n° 832 277 370.

POUR LES TRAJETS COURTS, PRIVILÉGIEZ LA MARCHE OU LE VÉLO. #SeDéplacerMoinsPolluer

A6
e-tron

Grâce à ses 713 kilomètres d'autonomie*, la Nouvelle A6 Avant e-tron 100 % électrique élargit le champ des possibles. Drastiquement.

Nous sommes Audi.

Voyagez sur la route du café avec la

TRANSAT CAFÉ L'OR

Le Havre Normandie

En savourant nos cafés d'origine en capsules et en grains

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 79 BOULEVARD SAINT GERMAIN – 75006 PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157, 70 EUROS.

SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

TRANSAT CAFÉ L'OR LE HAVRE NORMANDIE

PARTENAIRE FONDATEUR

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Il n'est pas trop tard

« *Je n'entends pas d'objection […] je déclare l'accord de Paris pour le climat adopté.* » Comme il semble loin le moment d'euphorie qui a suivi cette phrase prononcée par Laurent Fabius, président de la COP21. Objectif premier de cet accord international sans précédent : maintenir la hausse de la température moyenne *« bien en dessous de 2 °C »* par rapport à l'ère pré-industrielle, avec une ambition de 1,5 °C. C'était il y a dix ans. Seulement dix ans. Cette année, l'Organisation météorologique mondiale a déclaré que les 1,5 °C devraient être dépassés sur la période 2025-2029 avec une probabilité de 70 %. Les résultats ne sont pas à la hauteur, certes, et les attaques actuelles contre les climatologues sont dramatiques. Mais il ne faut pas céder au désespoir : l'Union européenne est en passe de réduire ses émissions nettes de 54 % d'ici à 2030 — l'objectif est de 55 % —, et la Chine aurait peut-être franchi son pic, même si le retrait américain fragilise l'effort mondial. Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement, *« il reste techniquement possible de rester sur une trajectoire à 1,5 °C »*, à condition d'une baisse annuelle de 7,5 %. C'est pourquoi la COP30, à Belém, sera décisive : chaque pays devra y revoir ses engagements. Les experts du climat assurent de façon unanime que la réduction effective de nos émissions est le principal levier d'action. Mais atteindre l'objectif exigera probablement un appui scientifique et technologique : capter le CO_2 à la sortie des usines les plus polluantes, renforcer la capacité de l'océan — qui a déjà absorbé le quart de nos émissions — à en stocker davantage, et préserver les puits terrestres de carbone. Autant de pistes qu'il faut explorer avec prudence, au risque de jouer aux apprentis sorciers du climat. Mais les sociétés accepteront-elles qu'elles fassent partie de la solution ? ■

La COP30, à Belém, sera décisive : chaque pays devra y revoir ses engagements

VOUS ÊTES ÉTUDIANT
ABONNEZ-VOUS DÈS MAINTENANT
profitez d'une remise exceptionnelle
en scannant ce QR code

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : B. BEAUJEU, J. BOUGHON, L. DUTHOIT, C. GOYA, L. HESPEL, P. KALDI, A. NEYRAT, M. PARRA, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement: Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
10-31-1557
pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte : une lettre Sciences et Avenir « bienvenue aux abonnés » et un encart « Sophia Boutique-Atlas du Moyen Orient » posés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi qu'un message « Sciences et Avenir - offre spéciale parrainage » et un encart « Fashion » posés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

CCF
BANQUE

BANQUE CENTENAIRE

nouvelle génération

Au Crédit Commercial de France, nous nous appuyons sur plus d'un siècle d'expérience pour proposer des solutions **adaptées aux besoins d'aujourd'hui.**

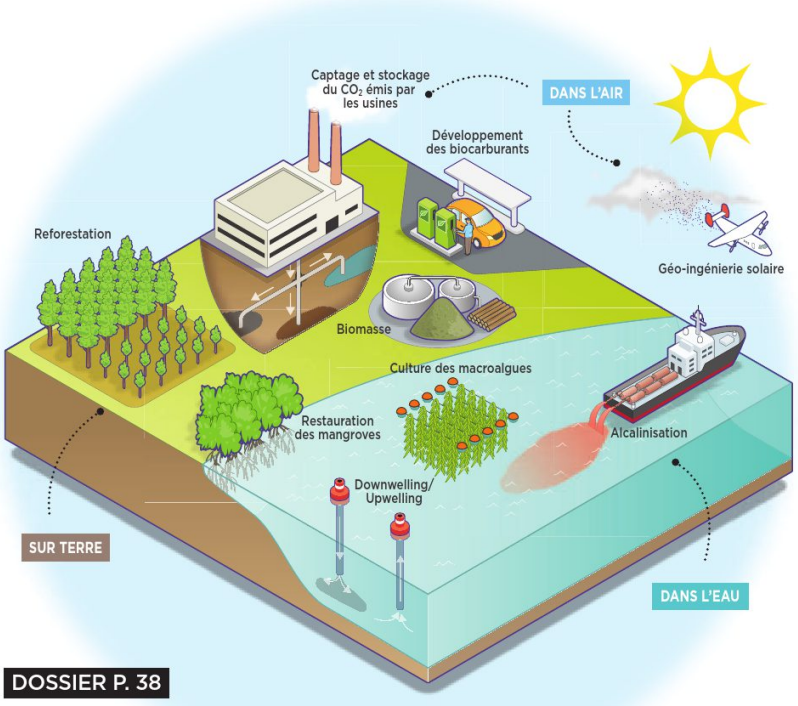
Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr).

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 945 / Novembre 2025



DOSSIER P. 38

La science peut-elle sauver le climat ?

Contre le réchauffement climatique, la géo-ingénierie vient en appui des solutions d'atténuation en débat à la COP30. Amplification des puits de carbone naturels, développement des techniques de captage et de stockage du CO_2, modification du rayonnement solaire... « Sciences et Avenir » a évalué la pertinence de ces méthodes.

P. 26

3I/Atlas, la comète de tous les records

Cet objet interstellaire fascine les astronomes. Âgé d'au moins 7 milliards d'années, ce serait la plus vieille comète connue. Et son étude pourrait nous éclairer sur la formation des systèmes planétaires.

P. 62

5 fruits et légumes par jour : décryptage d'un slogan

Malgré un consensus scientifique international sur l'effet protecteur des fruits et légumes contre les cancers et maladies cardio-vasculaires, cette campagne vieille de 25 ans est un échec en France.

P. 76

La France au cœur d'un trafic d'antiquités

Chaque année, des milliers d'objets d'intérêt archéologique sont pillés sur le territoire. Les pouvoirs publics développent des outils de traçage et de surveillance des sites.

5 **Édito** par Mathieu Nowak

PRIX NOBEL

8 **Les lauréats 2025**

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** La Nasa accélère son retour sur la Lune / Le théorème d'Hawking confirmé par l'observation

24 **Journal de l'IA : ChatGPT affaiblit-il notre cerveau ?**

26 **3I/Atlas, la comète de tous les records**

32 **Un algorithme prédit les blessures des rugbymans**

35 **La réalité virtuelle en toute liberté**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** En Amazonie, le CO_2 dope les arbres / Les séismes de Santorin décryptés

56 **Le renouveau de la mine en question**

60 **Le compostage funéraire, une alternative écologique**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** L'aspirine contre la récidive du cancer colorectal / Delphi-2M calcule les risques de maladies

62 **5 fruits et légumes par jour : décryptage d'un slogan**

68 **On a fait naître des bébés avec trois ADN**

72 **Attentats de 2015 : « Un traumatisme collectif d'un genre inédit »**

74 **Nutrition : Sous la protection des oméga-3**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Des gravures géantes pour retrouver les oasis / Nos doigts ont pour origine le cloaque

76 **La France au cœur d'un trafic d'antiquités**

82 **Dès le Moyen Âge, le suaire de Turin n'était pas considéré comme une relique**

85 **Yunxian 2, le nouveau crâne de la discorde**

86 **Histoire des sciences : Gödel et l'indécidabilité : des mythes à la réalité**

RENDEZ-VOUS

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

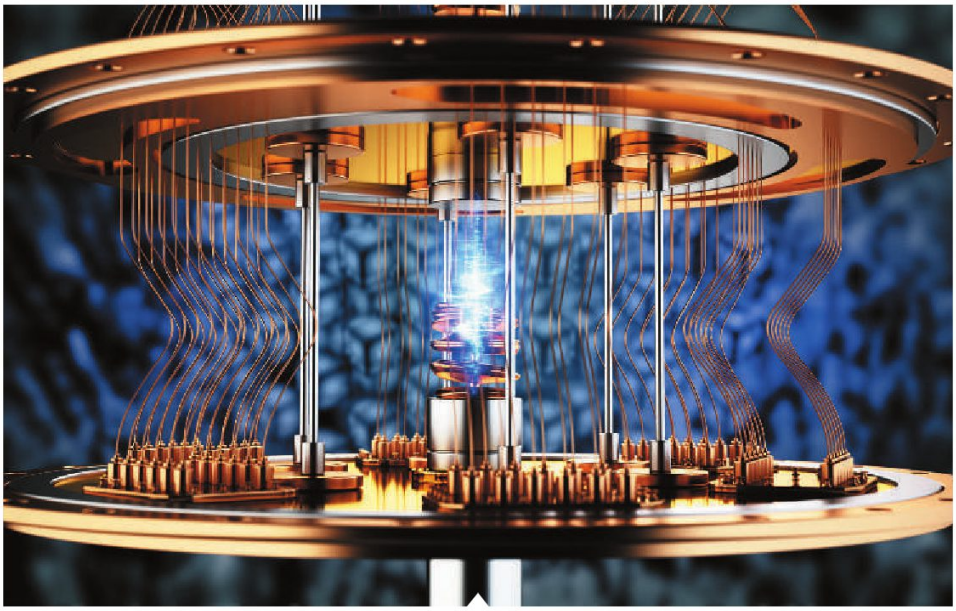
94 **Questions de lecteurs**

95 **Courrier**

96 **Le ciel de novembre**

98 **À retrouver sur le Web**

BRUNO BOURGEOIS - SHUTTERSTOCK - B.BOCCAS/NOVAPIX / BRIDGEMAN IMAGES - MONTAGE SCIENCES ET AVENIR - PATRICK ALLARD/REA - PATRICK LANDMANN / SPL / SUCRÉ SALÉ



GETTY IMAGES

Le développement de l'ordinateur quantique est l'une des applications rendues possibles grâce aux travaux des trois chercheurs primés (vue d'artiste).

PHYSIQUE

La physique quantique change d'échelle

Les nobélisés ont montré que l'on pouvait faire de la physique quantique avec des objets macroscopiques et non plus seulement avec les atomes.

Si l'ordinateur quantique et ses étranges qubits sont aujourd'hui à portée de main, c'est largement grâce à eux. Le Britannique John Clarke, le Français Michel Devoret et l'Américain John Martinis ont reçu, mardi 7 octobre, le prix Nobel de physique pour leurs « *expériences ayant révélé des effets quantiques macroscopiques dans des circuits électriques supraconducteurs* », *dixit* le jury du Nobel. Le prix couronne ainsi, un siècle après la naissance de la mécanique quantique, le moment où elle sort du laboratoire pour s'introduire lentement dans notre quotidien au travers des technologies quantiques, des capteurs aux ordinateurs en passant par la cryptographie. Les trois chercheurs ont réussi à montrer que des propriétés que l'on croyait réservées au monde des particules pouvaient émerger à l'échelle d'un objet tenu dans la main.

SIPA

Les lauréats
(de gauche à droite)
John Clarke (Royaume-Uni), université de Californie à Berkeley (États-Unis).
Michel Devoret (France), John Martinis (États-Unis), université de Californie à Santa Barbara (États-Unis).

La première de ces propriétés est l'effet tunnel. Il a été mis en évidence dès 1928 grâce aux travaux du physicien George Gamow pour expliquer la désintégration alpha de certains noyaux radioactifs : une particule peut en effet s'échapper du noyau en franchissant une barrière d'énergie pourtant infranchissable. Tout se passe alors comme si la particule se frayait un tunnel à travers cette barrière. Inspiré par les travaux théoriques d'Anthony Leggett — prix Nobel de physique 2003 — sur l'effet tunnel dans une jonction Josephson [composée de deux supraconducteurs séparés par un isolant], John Clarke, dans son laboratoire de Berkeley (États-Unis), observe en 1985 que le circuit supraconducteur qu'il étudie avec Michel Devoret (alors postdoctorant) et John Martinis (doctorant), censé rester dans un état stable sans produire de tension, se met soudain à générer une tension mesurable. Autrement dit, le système a réussi à franchir tout seul la barrière d'énergie que constitue l'isolant entre les deux supraconducteurs. C'est la preuve qu'un effet tunnel s'est produit, à l'échelle d'un objet macroscopique.

L'étrange physique des supraconducteurs

Pour comprendre comment il s'est manifesté, il faut plonger dans la physique étrange des supraconducteurs. À très basse température, les électrons cessent de se comporter comme des particules isolées : ils s'apparient deux à deux pour former ce qu'on appelle des paires de Cooper. En couple, les électrons perdent leur individualité : ils se fondent dans une même onde quantique, un seul « train » qui file sans résistance, comme s'il creusait son propre passage à travers la matière. C'est cette cohésion parfaite qui permet au

système, dans l'expérience de Berkeley, de franchir la barrière d'énergie d'un seul tenant — comme une particule géante creusant son tunnel.

La découverte d'un effet tunnel à l'échelle macroscopique consacre une véritable équipe d'exception, comme le résume Benjamin Huard, professeur à l'École normale supérieure de Lyon, spécialiste des technologies quantiques : *« John Clarke, physicien complet et d'une immense culture, est avant tout un artisan de la mesure : il a porté à un niveau inégalé la sensibilité des dispositifs de détection magnétique. Michel Devoret, lui, allie une compréhension théorique très fine des phénomènes quantiques à un sens aigu de l'expérimentation ; son intuition et sa capacité à cerner l'essence des phénomènes lui permettent de révéler expérimentalement ce que personne n'avait pu identifier. Enfin, John Martinis apporte une maîtrise d'ingénieur hors pair : expert en instrumentation, en fabrication et en programmation, il sait concrétiser les idées dans des dispositifs fonctionnels. »*

De véritables atomes artificiels

Mais ce n'est pas la seule propriété étrange que le trio met en évidence. En étudiant de près la tension produite par leur circuit, ils remarquent que celui-ci ne change pas d'état de façon continue. Il « saute » d'un niveau d'énergie à un autre, comme s'il montait ou descendait les marches d'un escalier invisible. Chaque marche correspond à une quantité d'énergie bien précise, un quantum, exactement comme dans les atomes. Un résultat fascinant : les lois de la physique quantique, jusque-là réservées au monde des particules, s'appliquent bel et bien à un objet que l'on peut tenir entre les doigts. *« C'est extraordinaire de penser que l'on peut structurer l'architecture quantique, en construisant de toutes pièces des systèmes où se manifestent les lois les plus subtiles de la physique »*, conclut Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022 pour ses expériences sur l'intrication quantique.

Leurs travaux vont mener aux qubits supraconducteurs, de véritables atomes artificiels. Ils constituent aujourd'hui l'une des plateformes les plus avancées pour la construction d'ordinateurs quantiques. D'ailleurs, Michel Devoret consacre désormais une partie de son temps à conseiller Google Quantum AI, qui, en décembre 2024, annonçait la mise au point d'un microprocesseur de 105 qubits de ce type. ■

Fabrice Nicot avec Philippe Pajot

CHIMIE

Les éponges moléculaires distinguées

Ces matériaux, qui se présentent souvent sous la forme de poudre, possèdent des capacités d'absorption inouïes.

Le Nobel de chimie récompense un trio de chercheurs — le Japonais Susumu Kitagawa, le Britannique Richard Robson et l'Américano-Jordanien Omar Yaghi — qui ont joué un rôle déterminant dans la mise au point d'une nouvelle famille de matériaux, les réseaux organométalliques, plus connue sous l'acronyme anglais MOF (metal-organic framework) — que *Sciences et Avenir* avait mis en avant l'été dernier (S. et A. *n° 941, p. 32*). Ces solides cristallins, qui se présentent souvent sous la forme de poudre, possèdent des capacités d'absorption inouïes. Grâce à leur structure poreuse, dont les cavités ne dépassent pas un dixième de milliardième de mètre, ils constituent d'extraordinaires éponges moléculaires, un gramme de MOF pouvant contenir une surface équivalente à un terrain de football ! Des propriétés exploitées aujourd'hui *« pour capter l'eau de l'air du désert, capturer le dioxyde de carbone, stocker des gaz toxiques ou catalyser des réactions chimiques »*, liste l'Académie royale des sciences de Suède. C'est en raison de leur structure hybride que ces matériaux « gruyère » ont tant de débouchés industriels. Ils sont composés d'ions métalliques (fer, cobalt, aluminium…) portant des charges électriques positives, et de molécules organiques chargées négativement constituées de carbone, d'azote ou d'oxygène. En jouant sur le nombre et le type d'ions métalliques ainsi que sur la géométrie et les dimensions des chaînes carbonées, les chercheurs fabriquent ainsi des myriades de matériaux absorbants, dont la taille des pores et les affinités chimiques sont modulées selon les propriétés recherchées — pour piéger l'eau atmosphérique ou décomposer des substances nocives, par exemple.

Les bases ont été posées en 1989 par Richard Robson. Le Britannique combine alors des ions cuivre avec une molécule organique au nom interminable — le tétracya-

AFP

Les lauréats
(de gauche à droite)
Susumu Kitagawa (Japon), université de Kyoto.
Richard Robson (Royaume-Uni), université de Melbourne (Australie).
Omar Yaghi (États-Unis, Jordanie), université de Californie à Berkeley.

notétraphénylméthane — qui possède quatre « bras » dont les extrémités sont attirées par les espèces métalliques.
En se combinant, ces éléments forment une structure ordonnée qui se répète sur une large échelle, un peu comme les atomes de carbone dans le diamant mais avec un nombre incalculable de pores. Les constructions de Richard Robson sont néamoins très fragiles et on doute alors qu'elles puissent jamais avoir des applications industrielles. Mais entre 1992 et 2003, Susumu Kitagawa et Omar Yaghi prouvent que ces architectures sont bien plus qu'une curiosité de laboratoire.

Plus de 130 000 structures de MOF créées

Le Japonais effectue les premières percées en 1997. En associant des ions cobalt, nickel ou zinc à de la pyridine, il montre que le cristal obtenu se stabilise en présence d'eau et que ses pores peuvent absorber ou relarguer du méthane, de l'azote ou de l'oxygène. Omar Yaghi travaille lui aussi sur ces cages moléculaires auxquelles il donne le nom de MOF. Composé de molécules aromatiques et d'oxydes de zinc, le spécimen qu'il met au point en 1999 stupéfait le monde des chimistes. Appelé MOF-5, il reste stable à 300 °C, même à vide ; et la surface de contact par unité de volume atteint 2200 m^2 par cm^3, un record. On recense aujourd'hui plus de 130 000 structures de MOF… et des dizaines de start-up qui se concentrent en particulier sur la capture des gaz à effet de serre. ■ **Franck Daninos**

MÉDECINE

Aux origines de la régulation de l'immunité

La découverte d'un mécanisme impliqué dans le développement des maladies auto-immunes a été récompensée.

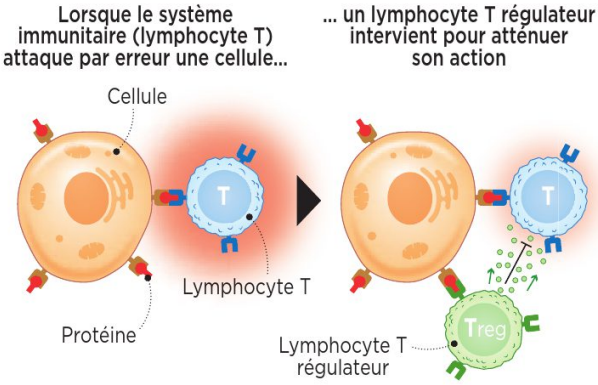
Comment le système immunitaire fait-il pour distinguer le soi du non-soi ? Autrement dit, ce qui est étranger au corps, et doit donc être attaqué, de ce qui ne l'est pas. C'est à cette question cruciale que les primés du Nobel de physiologie ou médecine 2025 ont répondu. Les Américains Mary Elizabeth Brunkow, Fred Ramsdell et le Japonais Shimon Sakaguchi ont été récompensés pour *« leurs découvertes révolutionnaires concernant la tolérance immunitaire périphérique, qui empêche le système immunitaire de nuire à l'organisme »*, précise ainsi le comité.
Tout commence en 1995 lorsque Shimon Sakaguchi étudie des souris sans thymus, organe de maturation des cellules immunitaires chargé d'éliminer celles qui risqueraient de réagir contre les cellules du corps. De fait, sans thymus, ces agents trop pointilleux ne sont pas filtrés, et les rongeurs développent des maladies auto-immunes. Sauf que l'immunologue va montrer qu'il existe un deuxième filtre, en place, lui, dans le sang. Des cellules régulatrices capables de calmer l'action d'agents immunitaires trop zélés. Preuve en est : l'injection de ces lymphocytes T régulateurs (Treg) suffit à réduire les réactions auto-immunes chez les rongeurs.

AFP-SIPA

Les lauréats
(de gauche à droite)
Mary Elizabeth Brunkow, (États-Unis), Institute for Systems Biology, Seattle.
Fred Ramsdell (États-Unis), Sonoma Biotherapeutics, San Francisco.
Shimon Sakaguchi (Japon), université d'Osaka.

Le gène responsable identifié

L'autre découverte majeure de la tolérance immunitaire périphérique est faite en 2001 par les Américains. Chez une lignée de souris très vulnérable aux réactions auto-immunes, ils identifient une mutation génétique nommée Foxp3, dont l'équivalent humain provoque une grave maladie, l'Ipex. Une avancée reprise par Shimon Sakaguchi deux ans plus tard : c'est précisément ce gène qui contrôle le développement des lymphocytes régulateurs identifiés par lui quelques années plus tôt. La boucle est bouclée ! La caractérisation de ces cellules Treg a depuis permis de s'en servir pour des traitements anticancer et certaines maladies auto-immunes, notamment en cherchant à en faire produire plus dans l'organisme des malades. ■ **Hugo Jalinière**



BRUNO BOURGEOIS

Les lymphocytes T régulateurs agissent comme des contrôleurs de la réponse immunitaire.

PEUGEOT

GAGNEZ SUR TOUS LES TERRAINS

3008 HYBRIDE

DÈS **430 €** /MOIS (2)

SANS APPORT

LLD 49 MOIS

JUSQU'À **8** ANS PEUGEOT CARE GARANTIE (1)

ANTOINE DUPONT

ÉLU DEUX FOIS MEILLEUR JOUEUR DU MONDE DE RUGBY. (3)

(1) Peugeot Care: voir conditions sur peugeot.fr (2) Location Longue Durée 49 mois 40 000km 3008 Hybrid Allure neuf hors option. Offre non cumulable, sous condition de reprise et d'immat. jusqu'au 30/11/25, réservée particuliers dans réseau participant, si accord CREDIPAR RCS Versailles 317425981, n°ORIAS 07004921. Ex. présenté aux mêmes conditions : E-3008 GT exclusive avec options : 540€/mois sans apport. Conditions de reprise dans réseau participant. Condition peugeot.fr (3) Elu meilleur joueur de rugby à 7 par les world rugby awards en 2023 et 2024.

Au quotidien, prenez les transports en commun. #SeDéplacerMoinsPolluer

RICARDO RAMIREZ BUXEDA/ORLANDO SENTINEL/ZUMA/REA

Les quatre astronautes de la mission Artemis II effectueront un voyage de 10 jours autour de la Lune.

La Nasa accélère son retour sur la Lune

Ce premier survol habité depuis le programme Apollo devrait se dérouler dès le mois de février 2026.

L'Agence spatiale américaine a créé la surprise en annonçant que la mission Artemis II pourrait s'élancer dès le 5 février 2026. D'abord prévu en 2024, ce premier survol habité de la Lune depuis plus de cinquante ans a connu plusieurs reports en raison de problèmes techniques survenus en 2022, lors du vol non habité Artemis I. La deuxième étape du programme visant à ramener des humains sur la Lune et à y établir une présence américaine durable était ainsi planifiée pour avril 2026. Mais la Nasa a décidé d'accélérer : *« C'est très inhabituel qu'une date de tir soit avancée »*, relève Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiale. La Nasa veut *« montrer qu'Artemis est sur les rails et afficher une grande confiance dans ses capacités »*, commente l'astrophysicien, alors que la Chine ambitionne d'envoyer elle aussi des humains sur la Lune d'ici à la fin de la décennie et pourrait doubler les États-Unis dans cette nouvelle course à l'espace.

S'assurer que la mission ne présente aucun risque

Avant de poser des astronautes sur la Lune, *« un vol habité testant les équipements et s'assurant que la mission ne présente aucun risque pour l'équipage est néanmoins indispensable »*, souligne Francis Rocard. C'est la fonction d'Artemis II, qui utilisera la fusée géante Space Launch System pour placer en orbite lunaire la capsule Orion. Avec à son bord trois Américains (Reid Wiseman, Christina Koch, Victor Glover) et un Canadien (Jeremy Hansen). Leur voyage, qui les fera passer derrière la Lune à près de 400 000 km de la Terre, durera dix jours. *« Dès qu'il y a des astronautes à bord, la Nasa vérifie tout plutôt trois fois qu'une »*, atteste Francis Rocard. Mais les véritables problèmes concernent Artemis III. Prévu au second semestre 2027, ce troisième volet utilisera le système d'alunissage Starship HLS, développé par la société SpaceX d'Elon Musk, pour déposer deux astronautes sur la Lune. *« Or, le Starship est loin d'être validé. On est pour le moment dans une incertitude totale concernant le calendrier »*, prévient Francis Rocard. **F. D.**

Les feux follets s'illuminent en laboratoire

PHYSIQUE Un trio de chercheurs vient de résoudre le mystère des feux follets, ces lueurs qui virevoltaient jadis au-dessus de tombes trop perméables en milieu humide. On se doutait que le méthane émis par la décomposition des corps était impliqué, mais le processus exact était inconnu. Grâce à un générateur injectant des microbulles d'air et de méthane à l'intérieur d'un réservoir d'eau, une équipe a pu observer que, lorsque la densité des microbulles devenait importante, des flashs lumineux fugaces se formaient à leur interface, indicateurs d'une oxydation du gaz. **H. R.**

AIRBUS

L'hélicoptère le plus rapide du monde

AÉRONAUTIQUE Avec une vitesse atteignant les 440 km/h, le Racer d'Airbus, qui a pris son envol fin septembre de la base de Marignane (Bouches-du-Rhône), est devenu l'hélicoptère le plus rapide au monde. Comme son prédécesseur l'Eurocopter X3, il s'agit d'un girodyne : au lieu d'un rotor de queue classique, il est doté d'un double empennage avec des hélices latérales permettant de gagner en vitesse sans perdre en stabilité. **H. J.**

Le théorème d'Hawking confirmé par l'observation

L'astrophysicien anglais avait énoncé en 1971 que la surface totale des trous noirs ne peut qu'augmenter au fil de leur existence.

AURORESIMONNET (SSU/EDEON)/LVK/URI

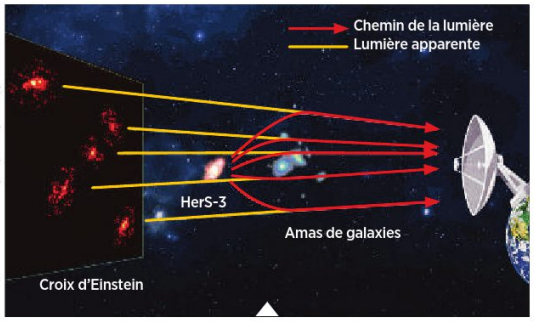
Le signal GW250114 s'est produit lorsque deux trous noirs d'environ 240 000 km² chacun ont fusionné (vue d'artiste).

Dix ans après la première détection d'ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015, la collaboration Ligo-Virgo (États-Unis/Europe), rejointe depuis par Kagra (Japon), s'offre un cadeau parfaitement choisi : la confirmation par l'observation d'un théorème formulé en 1971 par Stephen Hawking. L'astrophysicien anglais avait alors énoncé que la surface totale des trous noirs ne peut qu'augmenter au fil de leur existence, en dépit de l'émission d'ondes gravitationnelles qui tendraient plutôt à la diminuer. Cette prédiction restait théorique. L'événement GW250114, enregistré en janvier 2025, a livré un signal si net qu'il a permis de la vérifier *de visu*, ce dont l'astrophysicien n'aurait sans doute pas osé rêver il y a cinquante ans, lorsque l'existence même des trous noirs restait hypothétique. Deux astres de 30 à 40 masses solaires, d'environ 240 000 km² chacun, ont ainsi fusionné pour former un trou noir final de 400 000 km² — une augmentation conforme au théorème de Hawking, vérifié ici avec une confiance de 99,999 %. **F. N.**

IL A DIT

« Quelque part entre ma vision originale pour le Web 1.0 et l'essor des médias sociaux dans le Web 2.0, nous avons pris la mauvaise voie »

Tim Berners-Lee, inventeur du World Wide Web en 1989, regrette dans une tribune au *Guardian* la mainmise de certaines plateformes sur les données personnelles et leur marchandisation.



N. LIRA, COX ET AL. – ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) / NOEMA

La lumière de la croix captée par le télescope correspond à une déformation de celle émise par la galaxie HerS-3.

Une croix d'Einstein à cinq points

ASTROPHYSIQUE **Une équipe internationale a dévoilé l'image inédite d'une croix d'Einstein à cinq points *(à gauche sur le schéma)*. Elle est formée par l'image démultipliée d'une petite galaxie lointaine, HerS-3, située à l'arrière-plan d'une autre source plus massive déformant l'espace-temps autour d'elle. Et donc la trajectoire de la lumière de HerS-3. Un phénomène de lentille gravitationnelle prédit par la relativité générale d'Einstein. J. B.**

SOURCE : PIERRE COX, SORBONNE UNIVERSITÉ, FRANCE.

13,6 térabits

La quantité de données transmises par des faisceaux laser

ESPACE L'expérience DSOC embarquée dans la sonde Psyché a communiqué 13,6 térabits de données depuis l'espace lointain entre novembre 2023 et septembre 2025. En transmettant des informations par des faisceaux laser plutôt que des ondes radio, la technologie augmente considérablement le flux de données : de 62 à 267 mégabits par seconde et jusqu'à 494 millions de kilomètres de la Terre ! **F. D.**

L'oxygène terrestre rouille la Lune

SÉLÉNOLOGIE La Lune « rouille » à cause de la Terre… un phénomène démontré désormais par des expériences de laboratoire. La présence d'oxyde de fer sur notre satellite naturel s'expliquerait par des réactions induites par des ions oxygène, transportés eux-mêmes depuis la Terre par des vents magnétiques lorsque notre planète est positionnée cinq jours par mois entre le Soleil et la Lune. **F. D.**

SOURCE : X. ZENG, UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE MACAO, CHINE.

GRÉGORY POL/NATURAGENCY

Les plus grands individus, qui captent davantage la lumière, connaissent une plus forte croissance.

En Amazonie, le CO_2 dope les arbres

L'augmentation constante des concentrations de dioxyde de carbone jouerait un rôle de fertilisant naturel.

La taille moyenne des arbres en Amazonie a augmenté de 3,3 % chacune de ces trois dernières décennies, en réponse à l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone (CO_2), pointe une étude de *Nature Plants*. C'est le constat d'une centaine de scientifiques d'universités sud-américaines et britanniques, qui suivent 188 parcelles permanentes depuis 30 ans. *« C'est une bonne nouvelle,* souligne Beatriz Marimon, professeure à l'université d'État du Mato Grosso (Brésil) et coauteure de la recherche. *On sait quelles menaces le changement climatique et la fragmentation représentent pour les forêts amazoniennes. Mais entre-temps, les arbres des forêts intactes ont grandi.* » Or, ces dernières jouent un rôle clé dans l'absorption du carbone qui, autrement, se retrouverait dans l'atmosphère *(lire p. 49)*.

Une remarquable résilience

Malgré les inquiétudes sur l'affaiblissement de l'effet puits de carbone, le rôle stimulant du CO_2 sur la croissance est toujours présent. Et témoigne de la remarquable résilience de ces forêts, du moins pour l'instant. *« Notre article souligne en creux l'ampleur des effets destructeurs de la déforestation en Amazonie. Les grands arbres tropicaux sont centenaires. On ne peut pas simplement planter de nouveaux arbres et espérer qu'ils apportent les mêmes bénéfices en matière de carbone ou de biodiversité que les forêts naturelles anciennes* », avertit Rebecca Banbury Morgan, de l'université de Bristol (Royaume-Uni). Précision : l'étude, qui portait sur la structure granulométrique des végétaux, montre que les arbres de toutes tailles ont grandi sur la même période ; la forêt entière a changé, avec un bonus pour les plus grands, ceux qui captent le mieux la lumière. Reste à déterminer si ces bénéfices suffiront à contrebalancer les effets indésirables redoutés pour les « géants », plus sensibles à la chaleur, à la sécheresse, à la foudre et aux déracinements par vents violents, concluent les auteurs. **R. M.**

CLAUDIUS THIRIET / NATURAGENCY

Cette mouche transporte du pollen sur plusieurs centaines de kilomètres.

Les syrphes, pollinisateurs à très longues distances

ENTOMOLOGIE Les syrphes, ces mouches à l'abdomen rayé de jaune, transportent le pollen de nombreuses plantes au cours de leurs migrations, montre une équipe d'écologues. L'analyse de dizaines de spécimens échoués sur une plate-forme pétrolière de la mer du Nord a identifié le pollen de 102 espèces de plantes d'Europe du Nord et souvent présentes en Écosse, leur destination. Preuve que ces diptères sont capables de polliniser sur des centaines de kilomètres. **P. K.**

SOURCE : TOBY DOYLE, UNIVERSITÉ D'EXETER, ROYAUME-UNI.

ELLE A DIT

« Un des grands risques au niveau mondial, c'est la contribution des datacenters au dérèglement climatique »

Pauline Denis, ingénieure de recherche au Shift Project, dont un nouveau rapport alerte sur un quadruplement des besoins en électricité des centres de stockage de données d'ici à 2035, rien qu'en France.

Le bois a aussi son microbiote

DENDROLOGIE Le bois des arbres contient son propre microbiote formé de bactéries, d'archées et de champignons, révèle une étude. Les communautés bactériennes varient même entre le bois central non irrigué, le duramen, et sa partie périphérique, l'aubier. Ce microbiote, distinct de celui d'autres parties des arbres ou du sol et qui n'a pas encore de fonction connue, participe à la première dégradation du bois lors de son pourrissement. **P. K.**

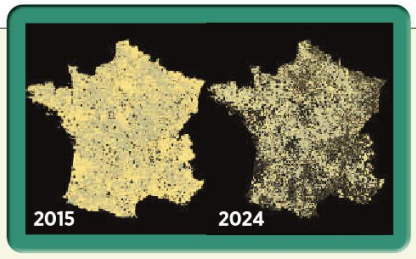
SOURCE : WYATT ARNOLD, UNIVERSITÉ YALE, ÉTATS-UNIS.

L'œil de Lascar

DISPARITION Elle était la championne de la cause des chimpanzés : la primatologue britannique Jane Goodall est décédée le 1er octobre, à 91 ans. En observant un de ces grands singes utiliser une tige pour attraper des termites, elle avait été la première à révéler qu'ils savent fabriquer des outils, à l'instar des humains. **O. L.**

En Suisse, la fonte des glaciers s'accélère

CLIMATOLOGIE Les glaciers suisses, qui jouent un rôle important pour l'énergie hydraulique, ont perdu 24 % de leur volume entre 2015 et 2025, selon une étude du Réseau des relevés glaciologiques suisse qui décrit *« une fonte considérable »*. La perte de volume mesurée était de 14 % entre 2000 et 2010 et de 10 % entre 1990 et 2000. Fin 2025, le volume de glace des 1400 glaciers suisses devrait s'établir à 45,1 km³, contre 75 km³ en 2000 selon l'étude. **H. J.**



OSECC – CEREMA

À VOIR SUR LE NET

Réduction drastique de l'éclairage en France

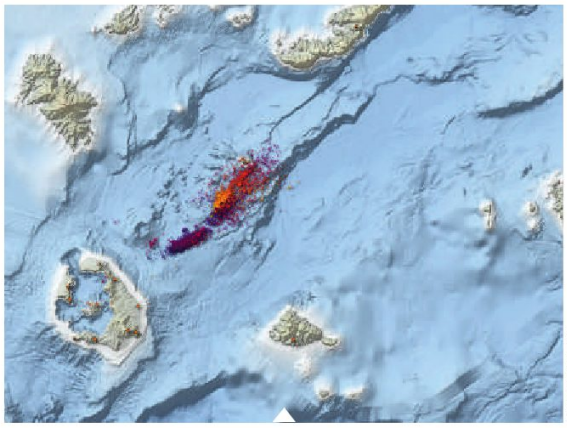
ÉCOLOGIE L'analyse de données satellitaires a permis au Cerema (établissement sous tutelle du ministère de la Transition écologique) de documenter l'évolution des pratiques d'éclairage de 19 262 communes françaises entre 2015 et 2024. Les objectifs de sobriété énergétique, de préservation du ciel nocturne et de biodiversité ont conduit 62 % de ces communes à une extinction totale des éclairages au cœur de la nuit. **S. R.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les séismes de Santorin décryptés

Les tremblements de terre ont été déclenchés par une intrusion de magma de 13 kilomètres de long.

Plus de 30 000 séismes ont fait trembler les îles grecques de Santorin et d'Amorgos entre octobre 2024 et février 2025. Façonnée à la suite d'une éruption volcanique survenue vers 1610 avant notre ère, et témoin d'un séisme de magnitude 7,7 qui engendra un tsunami en 1956, la région est connue pour ses événements sismiques. Mais cet épisode n'avait rien d'habituel. *« Cela ne ressemble pas à une crise d'origine tectonique »*, confiait en février 2025 Frédérique Leclerc, chercheuse à Géoazur (*lire* S. et A. *n° 941*). Son équipe émettait alors l'hypothèse d'un dyke, une fissure dans laquelle du magma s'infiltre et fracasse la roche sous pression pour se frayer un chemin. C'est ce que vient de confirmer une étude internationale dans *Nature* : le dyke s'est propagé sur 13 km sous le plancher océanique au départ d'une poche de 300 millions de m³ de magma piégée sous le volcan sous-marin de Santorin. L'événement indique qu'une connexion existerait entre les volcans de Santorin et Kolumbo, éloignés l'un de l'autre de 8 km. **E. T.**



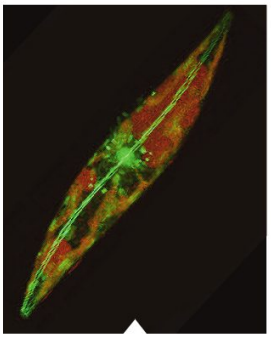
MARIUS ISKEN, GFZ

En seulement une semaine, du 29 janvier au 6 février 2025, plus de 4000 séismes ont été enregistrés au nord-est de Santorin.

Les diatomées patinent dans la glace

ZOOLOGIE Jusque-là considérées comme des microalgues dormantes, les diatomées prisonnières des glaces de l'Arctique sont en réalité très actives. Telles des patineuses, elles glissent dans les microcanaux de la matrice de glace grâce à une sécrétion de mucus qu'elles utilisent comme une « corde » pour se propulser à l'aide de moteurs moléculaires. Cette capacité, absente chez les diatomées tempérées, s'exerce jusqu'à -15 °C, la température la plus basse jamais enregistrée pour le mouvement d'une cellule complexe. **S. R.**

SOURCE : QING ZHANG, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.



PRAKASH LAB

Les filaments d'actine (en vert) permettent à la diatomée de se déplacer par -15 °C.

THIERRY GRUN/ONLYFRANCE.FR

Les périodes de traitement des vignobles devraient faire l'objet d'information auprès des populations avoisinantes.

Les riverains des vignes exposés aux pesticides

Les résultats d'une étude vont permettre la mise en place d'un suivi sanitaire plus poussé des habitants.

Les habitants vivant près des vignobles ont des teneurs plus élevées de pesticides dans leur urine et leurs cheveux qu'en zone éloignée de toute culture. C'est la conclusion de l'enquête PestiRiv menée en 2021 et 2022 par l'Anses et Santé publique France. L'étude a porté sur 250 communes dans six régions viticoles. Des échantillons d'urine et de cheveux ont été prélevés sur 2000 adultes et 750 enfants de 3 à 17 ans, en hiver et durant les épandages de printemps et d'été. 56 pesticides ont été recherchés, comme le folpel et le cuivre pour les fongicides, le glyphosate pour les herbicides et les pyréthrinoïdes pour les insecticides. Après épandage, l'imprégnation urinaire des riverains est ainsi supérieure de 15 à 45 %, tandis que l'air et les poussières — également analysés — sont dix fois plus contaminés. Ces résultats vont permettre la mise en place d'un suivi sanitaire. De nouvelles obligations d'information et de prise de précaution lors des épandages devraient également en découler. **L. C.**

La vie marine foisonne sur les missiles V1

ÉCOLOGIE Anémones, crabes, étoiles de mer, morues... Des chercheurs ont eu la surprise de découvrir une vie foisonnante en étudiant un site de décharge de missiles V1 abandonnés par les nazis en mer Baltique. Quelque 43 000 organismes au mètre carré vivent sur ces bombes volantes, soit cinq fois plus que sur les sédiments alentour. L'étude suggère que les nombreuses surfaces solides procurées par ces déchets l'ont emporté sur l'extrême toxicité de la zone. **H. R.**

85

Le nombre de nouveaux lacs détectés sous l'Antarctique

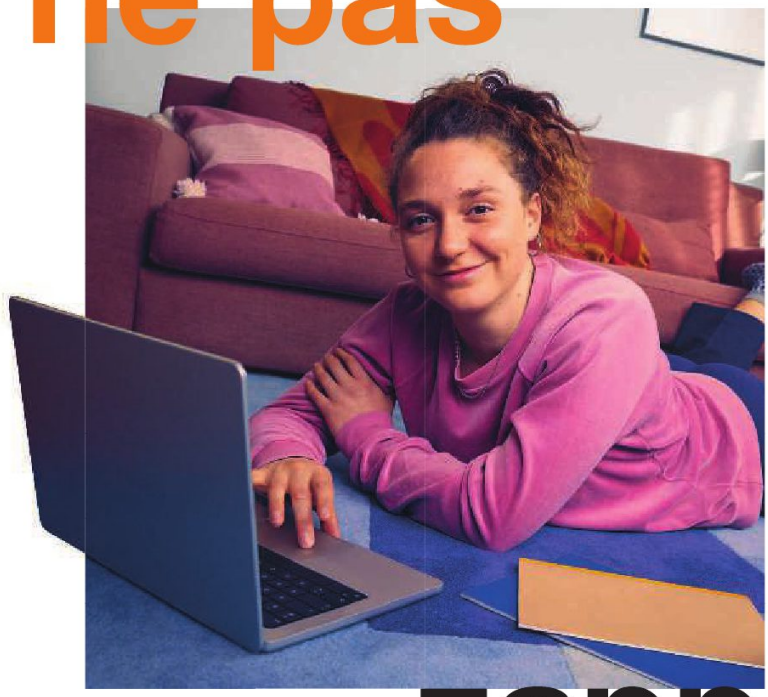
GÉOLOGIE Grâce à une décennie de données recueillies par le satellite CryoSat de l'Agence spatiale européenne, des chercheurs ont identifié 85 lacs, situés à plusieurs kilomètres sous la surface gelée entourant le pôle Sud. Cela porte à 231 le nombre de lacs sous-glaciaires connus en Antarctique. **H. J.**

Un drone nettoyeur des océans

TECHNOLOGIE Les équipes de Sea Cleaner à Paimpol (Côtes-d'Armor), filiale de l'industriel Efinor, ont annoncé la sortie prochaine d'un drone marin consacré à la collecte des déchets en mer. L'appareil de 5,5 mètres de long devrait être équipé de différents modules pour ramasser de manière autonome des déchets flottants liquides, comme les hydrocarbures, ou solides, comme les plastiques. En cours de production, il devrait être mis à l'eau d'ici à la fin de l'année. **H. J.**

EFINOR

Une offre à ne pas



zapper

Livebox Fibre

29,99 €/mois

pendant 12 mois puis 42,99 €/mois.

Avec Orange TV et la puissance du Wifi 7

Solutions communicantes pour les particuliers
ÉLU SERVICE CLIENT DE L'ANNÉE 2025

Soit 8 €/mois de remise et 5 €/mois remboursés[1] pour les nouveaux clients Fibre.

Offre soumise à conditions, en France métropolitaine, sous réserve d'éligibilité et équipements compatibles Wifi 7. Engagement 12 mois. Débits max. théoriques avec carte, câble et ordinateurs compatibles. Wifi 7 : bandes accessibles : 2,4 GHz et 5 GHz. Frais de mise en service : 49 €. Frais de résiliation : 60 €. Orange TV : hors services, contenus payants et sportifs en direct.

(1) Remboursement sur demande (à retourner avant le 19 janvier 2026) et appliqué au plus tôt à partir de la 2e facture Orange. *Catégorie Solutions communicantes pour les particuliers - Étude BVA Xsight - Viséo CI - Plus d'infos sur escda.fr

orange™ est là

L'aspirine contre la récidive du cancer colorectal

Une prise quotidienne réduit ce risque de moitié chez les personnes dont la tumeur porte une mutation génétique.

E.COENDERS/ PLAINPICTURE

Après le traitement chirurgical d'une tumeur colorectale, deuxième cancer le plus diagnostiqué en Europe, une récidive survient dans environ 40 % des cas dans les six ans. Mais la prise quotidienne d'aspirine réduit ce risque de moitié chez les personnes dont la tumeur porte une mutation sur le gène de l'enzyme PI3K, révèle une vaste étude suédoise menée par des chercheurs de l'Institut Karolinska. Dans l'essai clinique, les patients avaient pris chaque jour pendant trois ans une dose modérée du médicament (160 mg) ou un placebo.

Ce résultat confirme des études cliniques préliminaires antérieures ainsi que des observations faites *in vitro* sur les cellules cancéreuses du côlon. Plus du tiers des patients atteints d'un cancer colorectal portent cette mutation et pourraient donc bénéficier de l'effet anticancéreux de l'aspirine pour limiter les risques de récidive de leur maladie.

« Actuellement, le test de recherche de mutations dans le seul gène de la PI3K n'est pas systématique sur les adénocarcinomes du côlon, mais cette étude pourrait faire bouger les choses », espère le Pr Pierre Michel, gastro-entérologue et spécialiste du sujet au CHU de Rouen. Ce test existe d'ailleurs déjà dans le cas du cancer du sein hormono-dépendant, pour lequel un traitement bloquant la voie de signalisation de la PI3K peut être proposé si la mutation est détectée.

D'autres cancers seraient concernés

L'effet ciblé de l'aspirine pourrait aussi expliquer le résultat de certaines études montrant que la prise quotidienne d'aspirine à faibles doses réduit légèrement le risque d'apparition des cancers colorectal, du sein, de l'estomac, du pancréas et de l'ovaire. En effet, certains de ces cancers portent aussi des mutations sur la voie de signalisation de la PI3K. *« Cependant, l'utilisation de l'aspirine en prévention primaire du cancer colorectal dans la population générale n'est pas encore à l'ordre du jour et doit prendre en compte les autres facteurs de risque connus chez les patients »*, prévient Pierre Michel. **P. K.**

Xénogreffe : record de durée battu chez l'être humain

TRANSPLANTATION Tim Andrews vit depuis plus de neuf mois avec un rein de porc après une greffe effectuée le 25 janvier 2025 à Boston (États-Unis). L'organe, issu d'un porc génétiquement modifié pour faciliter la tolérance humaine, a été fourni par la société eGenesis. Celle-ci a obtenu une autorisation de xénogreffe de rein pour une trentaine d'autres patients de plus de 50 ans, sous dialyse à cause d'une insuffisance rénale en phase terminale. **P. K.**

MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

Le patient (au centre) vit avec un rein de porc depuis janvier.

Une crème anticicatrice prometteuse

DERMATOLOGIE Une unité australienne de recherche sur les brûlures a conçu une crème pour gommer les cicatrices en agissant sur le collagène dans la peau. Un essai clinique de phase 1 a montré qu'elle ne provoquait pas d'effets secondaires. Après trois mois d'application du baume, les médecins ont observé une plus grande densité des petits vaisseaux sanguins. **H. J.**

SOURCE : NATALIE MORELLINI, UNIVERSITÉ D'AUSTRALIE-OCCIDENTALE.

EXPO MUSÉUM

17·10·25

05·07·26

Domestique-moi si tu peux !

Au cœur de votre quotidien

museum.toulouse-metropole.fr

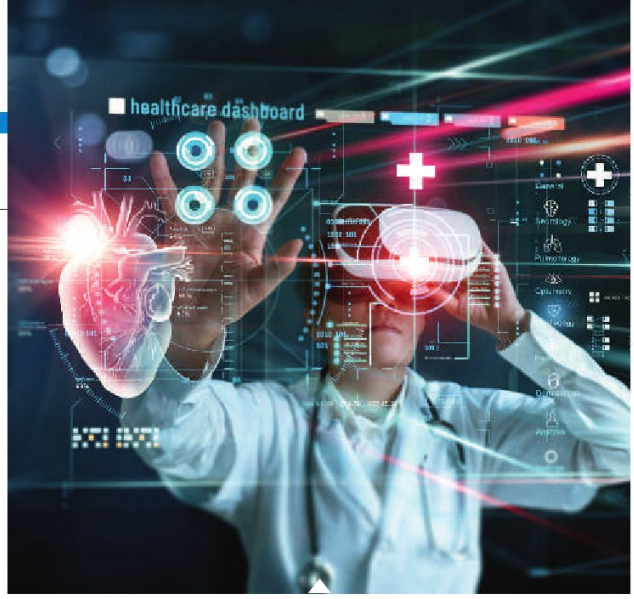
Cette exposition est reconnue d'intérêt national par le ministère de la Culture qui lui apporte à ce titre un soutien financier exceptionnel

toulouse métropole

www.sadaphotos.com

Delphi-2M calcule les risques de maladies

Cette intelligence artificielle générative peut évaluer le risque d'une personne de contracter plus de 1000 pathologies dans les dix ans.



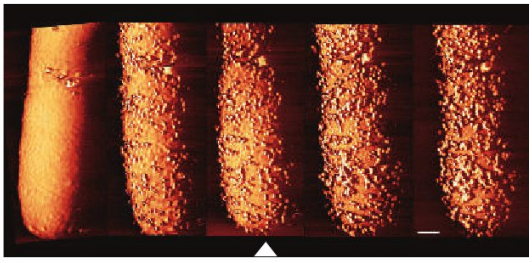
GETTY IMAGES

Le modèle a été entraîné sur les données de 2,3 millions de patients pour prédire les risques individuels de maladies.

En utilisant des concepts algorithmiques similaires à ceux utilisés dans les grands modèles de langage tels que ChatGPT, une équipe européenne a présenté dans *Nature* une IA générative capable de calculer le risque individuel de contracter plus de 1000 maladies dans la prochaine décennie. Les chercheurs du Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), du Centre allemand de recherche sur le cancer et de l'université de Copenhague (Danemark) ont nourri leur modèle baptisé Delphi-2M des données de 400 000 patients issus de l'étude UK Biobank et de 1,9 million de personnes du registre national des patients danois. L'IA recherche les événements médicaux dans l'historique du patient (date du diagnostic de telle ou telle maladie) et les facteurs liés au mode de vie : âge, sexe, etc. *« Les événements médicaux suivent souvent des schémas prévisibles,* note Tomas Fitzgerald, coauteur de l'étude. *Notre modèle apprend ces schémas pour prédire les futurs résultats en matière de santé. »* **H. J.**

EN DEUX MOTS

EMBRYOLOGIE Des chercheurs américains sont parvenus à créer par ingénierie cellulaire des ovocytes humains à partir de cellules de peau adultes, et à en féconder certains. **GÉNÉTIQUE** Une thérapie génique administrée directement dans le cerveau a permis de ralentir de 75 % la neurodégénération chez 17 patients atteints de la maladie de Huntington, une première. **MICROPLASTIQUES** Selon une étude autrichienne, les microbiotes humains sont largement perturbés lorsqu'ils sont exposés à des microplastiques.



C. BORRELLI, ET AL.

Vues d'une bactérie « E. coli » non traitée (à gauche), puis 15, 30, 60 et 90 minutes après exposition à une polymyxine.

Voici l'effet d'un antibiotique sur une bactérie

BACTÉRIOLOGIE La microscopie à haute résolution a permis de révéler la façon dont les antibiotiques de type polymyxines contournent l'armure de certaines bactéries comme *Escherichia coli*. En incitant la bactérie à fabriquer de nouvelles « briques » dans son armure moléculaire, le traitement la force aussi à en perdre, et crée ainsi des brèches temporaires dans cette défense. **H. J.**

SOURCE : CAROLINA BORRELLI, UNIVERSITY COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

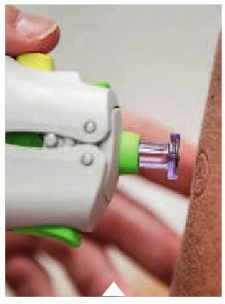
La bronchiolite, évitable chez les personnes âgées

VIROLOGIE En France, le virus respiratoire syncitial (VRS) entraîne entre 6000 et 14 000 hospitalisations par an chez les plus de 74 ans, révèle une estimation. D'une durée de 12 jours en moyenne, elles sont suivies d'un décès dans près de 10 % des cas et peuvent coûter jusqu'à 76 millions d'euros. La vaccination, récemment recommandée par la Haute autorité de santé pour les plus de 74 ans, sauverait des vies, constatent les chercheurs. **P. K.**

SOURCE : STÉPHANE MAROT, SORBONNE UNIVERSITÉ, FRANCE.

Masser la peau pour vacciner sans piqûre

IMMUNOLOGIE C'est une solution efficace qui pourrait être proposée aux 10 % de la population qui souffrent d'une phobie des aiguilles — la bélénophobie : des vaccins administrés sans injection par une sorte de massage de la peau. Un dispositif d'aspiration, testé sur des échantillons d'épiderme, montre que l'effet ventouse permet non seulement d'augmenter sa perméabilité, mais aussi de mobiliser des cellules immunitaires essentielles à la réponse vaccinale. **C. G.**



LLOYD MANN, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Le dispositif, testé avec succès chez la souris, pourrait être proposé notamment aux enfants.

SOURCE : ELODIE SEGURA, INSTITUT CURIE, FRANCE.

Cholestérol : attention aux excès !

Le cholestérol est indispensable à l'organisme. Constituant fondamental des membranes cellulaires, il permet aussi de fabriquer la testostérone, les oestrogènes ainsi que la vitamine D. Cependant, un excès de cholestérol peut entraîner la formation de dépôts, appelés plaques, sur les parois des artères.

Cholestérol et stress oxydatif : un facteur aggravant

Les résultats des dernières études scientifiques montrent que le stress oxydatif est un facteur aggravant pour la formation de ces plaques. Il déclenche une réaction immunitaire faisant intervenir des globules blancs qui viennent s'ajouter aux dépôts de cholestérol, augmentant l'épaisseur de la plaque.

Qu'est-ce que le stress oxydatif ?

Le fonctionnement normal de l'organisme génère des radicaux libres, des particules très énergétiques essentielles au bon fonctionnement de l'organisme, mais qui peuvent endommager les cellules lorsqu'elles sont en excès, si elles ne sont pas neutralisées par des antioxydants. On parle alors de stress oxydatif.

Préserver naturellement la santé cardiovasculaire

L'apport d'actifs naturels, par l'alimentation et/ou par une supplémentation, peut aider à réguler les taux de cholestérol et à diminuer le risque de formation de plaques.

Connaissez-vous l'ail noir ?

L'ail noir est obtenu par un processus de maturation permettant de concentrer les principes bioactifs de l'ail. Il est ainsi 10 fois plus riche en antioxydants que l'ail frais.

Innovation pour lutter contre le cholestérol

ControlStérol aide à réguler naturellement les taux de cholestérol grâce à une combinaison unique d'extraits concentrés d'Ail noir riche en antioxydants et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels. Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à limiter le «mauvais» cholestérol LDL et son oxydation, limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en augmentant le «bon» cholestérol HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

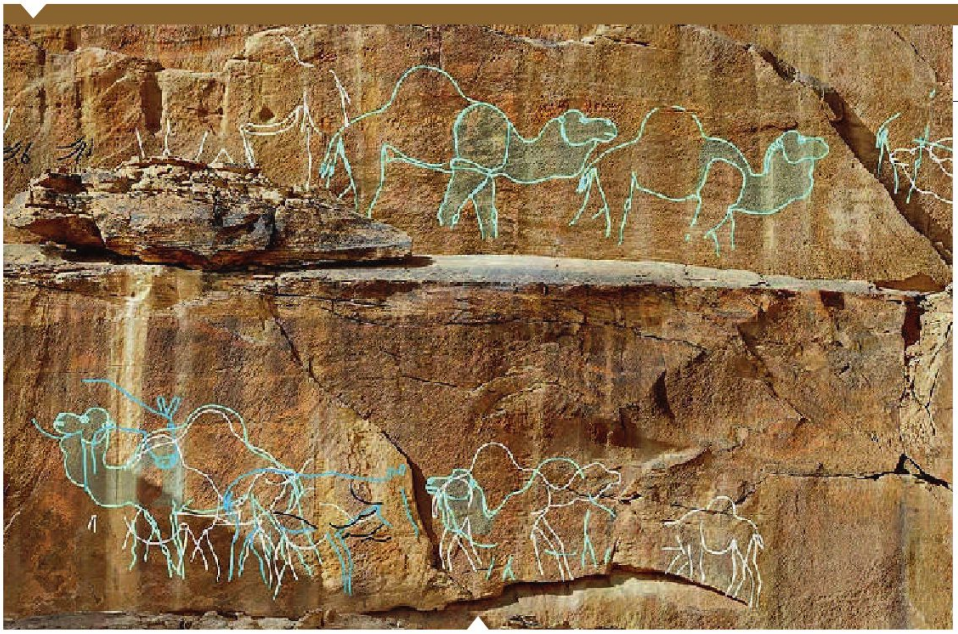
ControlStérol™
Régulateur de cholestérol naturel

Disponible en pharmacie

ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gél "jour" & 30 gél "nuit") ACL 626 04 90 - Convient aux végétaliens

Des conseils ?

Les experts PhytoResearch vous répondent au **01 85 42 33 10** ou sur **www.controlsterol.com**



M. GUAGNIN ET AL.

Âgées de 12 000 ans, ces figures animales gravées (dont les contours ont été surlignés) mises au jour à Jebel Misma (Arabie saoudite) signalaient l'emplacement de sources d'eau temporaires.

Des gravures géantes pour retrouver les oasis

176 pétroglyphes dessinés sur les falaises révèlent une occupation intermittente mais régulière du cœur aride de la péninsule Arabique.

Dans le nord de l'Arabie saoudite, aux marges du désert du Néfoud, des dizaines de silhouettes animales ont été gravées il y a plus de 12 000 ans sur les parois de falaises. Mais ces dessins n'avaient rien de décoratif, selon une étude publiée dans *Nature Communications* : ils signalaient l'emplacement de mares saisonnières et de passages utiles dans un environnement quasi désertique. Au tournant de l'holocène, l'intérieur de la péninsule Arabique sort à peine d'une période très aride. La région reste sèche, mais des mares et des lacs temporaires se forment dans des dépressions. Les fouilles menées à Jebel Arnaan, Jebel Mleiha et Jebel Misma (trois massifs situés au rebord sud du Néfoud) documentent 62 panneaux et 176 figures, dont 130 sont grandeur nature. Elles représentent majoritairement des camélidés, mais aussi des bouquetins, des équidés, des gazelles et un auroch.

Des réservoirs naturels fréquentés par la faune

Toutes ces représentations ont été gravées en surplomb d'anciennes dépressions et de crevasses profondes où l'eau s'accumulait après les pluies. Des réservoirs naturels, appelés localement jubos. *« Les sédiments n'ont ni traces de racines ni horizons organiques, ce qui indique un milieu aride avec peu de végétation,* explique Maria Guagnin, de l'institut Max-Planck de géoanthropologie (Allemagne). *Mais les jubos pouvaient conserver de l'eau pendant la saison sèche et étaient fréquentées par la faune.* »

Selon les chercheurs, les pétroglyphes servaient à signaler ces points d'eau et indiquaient les routes pour y parvenir. *« À Jebel Misma et Jebel Arnaan, l'art rupestre surplombe un paléo-lac et des jubos, et à Arnaan certains panneaux jalonnent un raccourci à travers la montagne vers une autre cuvette »*, note Maria Guagnin. Ce langage rupestre aura permis à plusieurs générations de voyageurs de retrouver leur chemin. *« Ces groupes étaient mobiles, se déplaçant entre des points d'eau, tout en étant en contact avec des voisins du Levant à environ 400 km et avec un accès à des coquillages marins »*, conclut la chercheuse. **J. I.**

Un mégaraptor découvert en Amérique du Sud

PALÉONTOLOGIE Un squelette de *Joaquinraptor casali* découvert en Patagonie est l'un des plus complets des mégaraptoridés. Ce dinosaure carnivore de 7 mètres aux griffes hypertrophiées pesait environ une tonne. Il a été retrouvé avec un os de crocodile encore coincé entre ses mâchoires. Il pourrait avoir été l'un des derniers grands prédateurs avant l'extinction des dinosaures non aviens, il y a 66 millions d'années. **J. I.**

SOURCE : LUCIO IBIRICU, UNIVERSITÉ NATIONALE DE PATAGONIE SAN JUAN BOSCO, ARGENTINE.

AP/SIPA

« Joaquinraptor casali » pesait environ une tonne (vue d'artiste).

Voltaire est mort d'un cancer de la vessie

PALÉOPATHOLOGIE Ce n'est pas un cancer de la prostate qui conduisit Voltaire (1694-1778) à prendre de fortes doses d'opium pour calmer ses douleurs les semaines avant sa mort, mais un cancer de la vessie. C'est l'analyse fine de son cœur embaumé, conservé à la Bibliothèque nationale de France, qui a mis en évidence une protéine spécifique de la tumeur — probablement provoquée dans son cas par des calculs biliaires récurrents. **H. J.**

SOURCE : PHILIPPE CHARLIER, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

On fumait les momies il y a 12 000 ans

ANTHROPOLOGIE Les plus anciens corps ayant fait l'objet d'une momification artificielle l'ont été il y a 12 000 ans entre le sud de la Chine et le nord du Vietnam actuels… par fumaison ! L'analyse de squelettes exhumés de 54 sépultures provenant de 11 sites dans la région montre que les corps — présentés le plus souvent accroupis — ont été soumis à une longue période de séchage à la fumée au-dessus du feu avant d'être enterrés. **H. J.**

SOURCE : HSIAO-CHUN HUNG, UNIVERSITÉ NATIONALE AUSTRALIENNE

Z. WHITROCK/WISCONSIN HISTORICAL SOCIETY

◀ **L'épave** du « F. J. King » modélisée en 3D.

Un navire fantôme au fond du lac Michigan

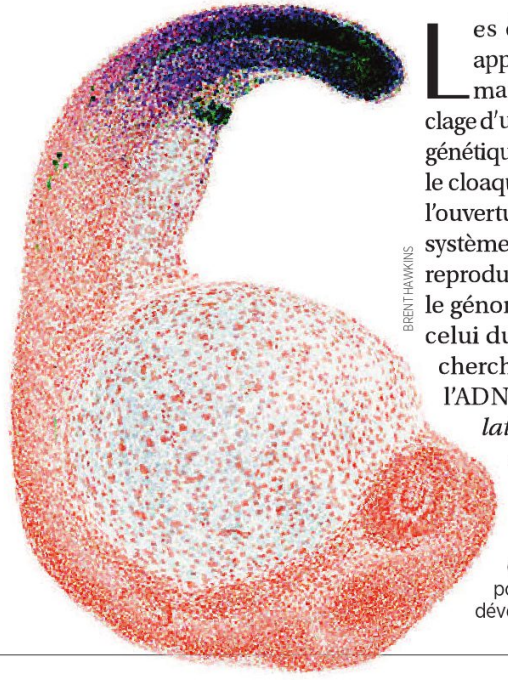
ARCHÉOLOGIE Disparu lors d'une violente tempête en 1888 dans les eaux du lac Michigan (États-Unis), le *F. J. King* s'était forgé une réputation de vaisseau fantôme parmi les chasseurs d'épaves. Mais la goélette cargo de 43,89 m qui transportait du minerai de fer a finalement bien été retrouvée au large des côtes du Wisconsin, a annoncé l'Association d'archéologie sous-marine de l'État américain. Les Grands Lacs abritent toujours entre 6000 et 10 000 épaves, dont la plupart restent à découvrir. **M. B.**

Le plus ancien atelier de parures de coquillages

PRÉHISTOIRE La découverte de pigments rouges et jaunes et de restes de petits coquillages, percés ou non, a révélé le plus ancien atelier connu de fabrication de parures en coquillages en Europe de l'Ouest. Il a été mis au jour sur le site paléolithique de La Roche-à-Pierrot (Charente-Maritime), et date d'il y a au moins 42 000 ans, selon une étude de l'université de Bordeaux. Il est associé au châtelperronien, culture de transition entre les derniers néandertaliens et l'arrivée d'*H. sapiens* en Europe. Mais impossible, pour l'heure, de dire s'il était aux uns ou aux autres. **H. J.**

Nos doigts ont pour origine le cloaque

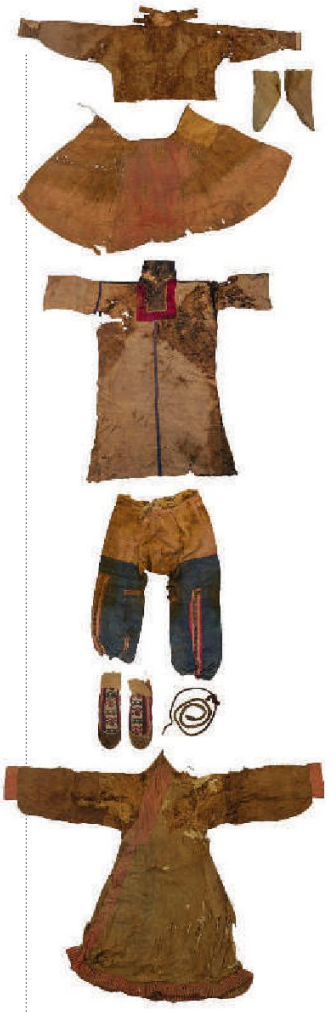
Une ancienne région régulatrice du génome aurait été recyclée lors de la transition vers la vie terrestre.



BRENT HAWKINS

◀ **C'est le gène HOX,** ici exprimé (en noir) dans le cloaque du poisson zèbre, qui a développé les doigts.

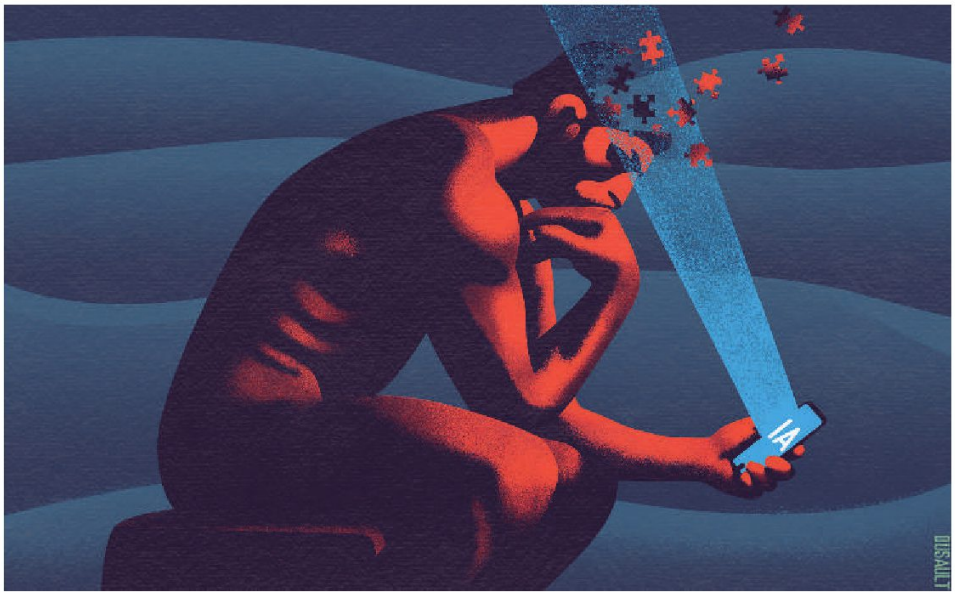
Les doigts ne sont pas apparus de toutes pièces mais résultent du recyclage d'un ancien programme génétique d'abord actif… dans le cloaque des poissons ! Soit l'ouverture où convergent les systèmes digestif, urinaire et reproducteur. En comparant le génome de la souris avec celui du poisson zèbre, les chercheurs ont repéré sur l'ADN un *« paysage régulateur »* commun aux deux espèces, impliqué dans le développement des doigts chez la souris. Grâce à des ciseaux génétiques, ils ont supprimé cette région chez le poisson, et ont alors observé la perte d'expression de gènes dans le cloaque, et non dans les nageoires. Ce lien aurait été suffisant pour activer le même programme régulateur génétique dans un nouveau contexte morphologique. L'étude publiée dans *Nature* suggère que ces modifications se sont produites chez les poissons sarcoptérygiens, déjà pourvus de poumons. Preuve que l'évolution innove en recyclant du vieux pour faire du neuf. **J. I.**



DAI / INSTITUT D'ARCHÉOLOGIE ET DU PATRIMOINE CULTUREL DU XINJIANG

Trois tenues pour les cavalières mongoles

ARCHÉOLOGIE Découvert en 1995 sur le site de Niya, dans le nord-ouest de la Chine, ce trousseau de vêtements de dix pièces récemment étudié composait trois tenues reflétant la mode de trois aires culturelles différentes de la route de la soie il y a 2000 ans. Outre un chemisier, une jupe portefeuille, des chaussures de laine, une robe-tunique, le pantalon bouffant était, lui, étudié pour monter à cheval. **S. de L.**



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

ChatGPT affaiblit-il notre cerveau ?

Moins de trois ans après le déploiement de l'agent conversationnel d'OpenAI, des études suggèrent que son usage a des effets néfastes sur la cognition. Des conclusions à relativiser et sans doute prématurées.

C'est le genre d'étude choc promise aux gros titres. En juin, une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT), aux États-Unis, publiait un travail tendant à montrer que ChatGPT diminuait les capacités cognitives de ses utilisateurs. Les chercheurs ont demandé à 54 participants de rédiger une dissertation, sur un sujet de l'équivalent américain du baccalauréat. Un tiers s'est aidé de ChatGPT, un autre de Google et le dernier tiers a écrit sans assistance. Le tout en trois sessions d'écriture réparties sur quatre mois, durant lesquelles l'activité cérébrale des rédacteurs était enregistrée avec un électroencéphalogramme. Résultats ? Moins un participant est autonome, moins son cerveau s'active. Chez ceux qui ont écrit sans aide, la connectivité neuronale était plus riche, avec plus d'interactions entre aires cérébrales. Et c'est chez les utilisateurs de ChatGPT que l'activité cérébrale s'avère la plus faible. Lors d'une quatrième séance, les participants ayant utilisé l'agent conversationnel ont dû écrire sans aide et *vice versa*. Les chercheurs relèvent alors que ceux qui sont passés de l'usage d'IA à l'absence d'assistance ont une activité cérébrale affaiblie. Ce que les chercheurs désignent sous la formule de *« dette cognitive »*. À l'inverse, ceux qui sont passés de l'écriture sans aide à ChatGPT ont réactivé certaines zones cérébrales de la mémoire. Cela suggère qu'en se souvenant de leurs précédentes rédactions, ils ont pu utiliser l'IA de manière plus critique et raisonnée. La prudence reste toutefois de mise. Cette étude n'a pas encore fait l'objet d'une relecture par les pairs et présente plusieurs limites méthodologiques : notamment un faible échantillon, peu diversifié, et une absence de subdivision de l'exercice de rédaction en sous-tâches, contrairement à d'autres études publiées sur le sujet.

83,3 %
des utilisateurs de ChatGPT n'ont pu citer une phrase du texte qu'ils venaient d'écrire, contre 11 % chez les autres.
SOURCE : MIT

Impossible d'évaluer les effets à long terme

Nawal Abboub, codirectrice de l'unité Sciences cognitives et société à l'École normale supérieure de Paris, tempère ainsi ces résultats : *« Si une technologie permet de faire moins d'effort pour obtenir le même bénéfice, le cerveau va naturellement l'adopter. Cela ne signifie pas qu'il est fainéant, il est câblé pour minimiser les coûts cognitifs face à un gain équivalent. »* Sans compter que, ChatGPT ayant été lancé en novembre 2022, il est non seulement trop tôt pour parler d'effets alarmants, mais aussi impossible de dire quels seront les effets à long terme de l'IA générative sur notre cerveau. Du temps et surtout des recherches répliquées s'imposent pour mieux en comprendre les répercussions sur notre mémoire, notre apprentissage ou notre raisonnement. Au stade actuel, en fait, *« c'est comme penser qu'une calculatrice empêche d'apprendre les mathématiques,* poursuit Nawal Abboub. *Comme tout nouvel outil apporté par le progrès, il y a de bons et de mauvais usages, c'est pour cela qu'il faut absolument les enseigner. »* ■

Bastien Beaujeu et Aurore Neyrat

IL A DIT

« Faire confiance à un outil d'intelligence artificielle sans vérification, c'est comme confier votre voiture à un jeune diplômé ivre »

Calum Chace, cofondateur de Conscium, société de conseil en IA de confiance, dans une tribune pour TheNextWeb.

JONATHAN RAA/NURPHOTO/AFP

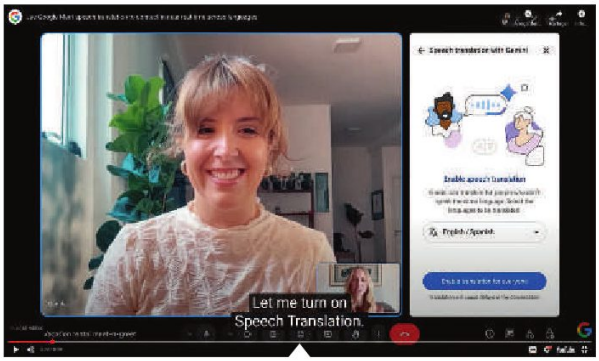
La nouvelle version de ChatGPT fait l'objet de nombreuses critiques depuis son lancement.

GPT-5 : débuts chaotiques

LLM Très attendue et plusieurs fois retardée, la nouvelle version du modèle de langage d'OpenAI est disponible depuis le 7 août. L'accueil des utilisateurs de ChatGPT a été plus que mitigé. Les performances ont été décriées et le ton des réponses, jugé trop froid et formel, a déplu. Devant les critiques, OpenAI a remis en service GPT-4o — que la nouvelle version avait fait disparaître —, mais seulement sur abonnement. **A. D.**

Google Meet traducteur

AUDIO **Depuis fin août, l'application de visioconférence permet la traduction audio en quasi-temps réel de propos tenus en français vers l'anglais et l'espagnol. Le son se rapproche autant que possible de la voix et des intonations du locuteur. Cette option s'appuie sur le modèle de langage AudioLLM de Google DeepMind mais ne profite qu'aux usagers des services payants Google AI.** **A. D.**



GOOGLE

L'application de visioconférence traduit les paroles en sous-titres.

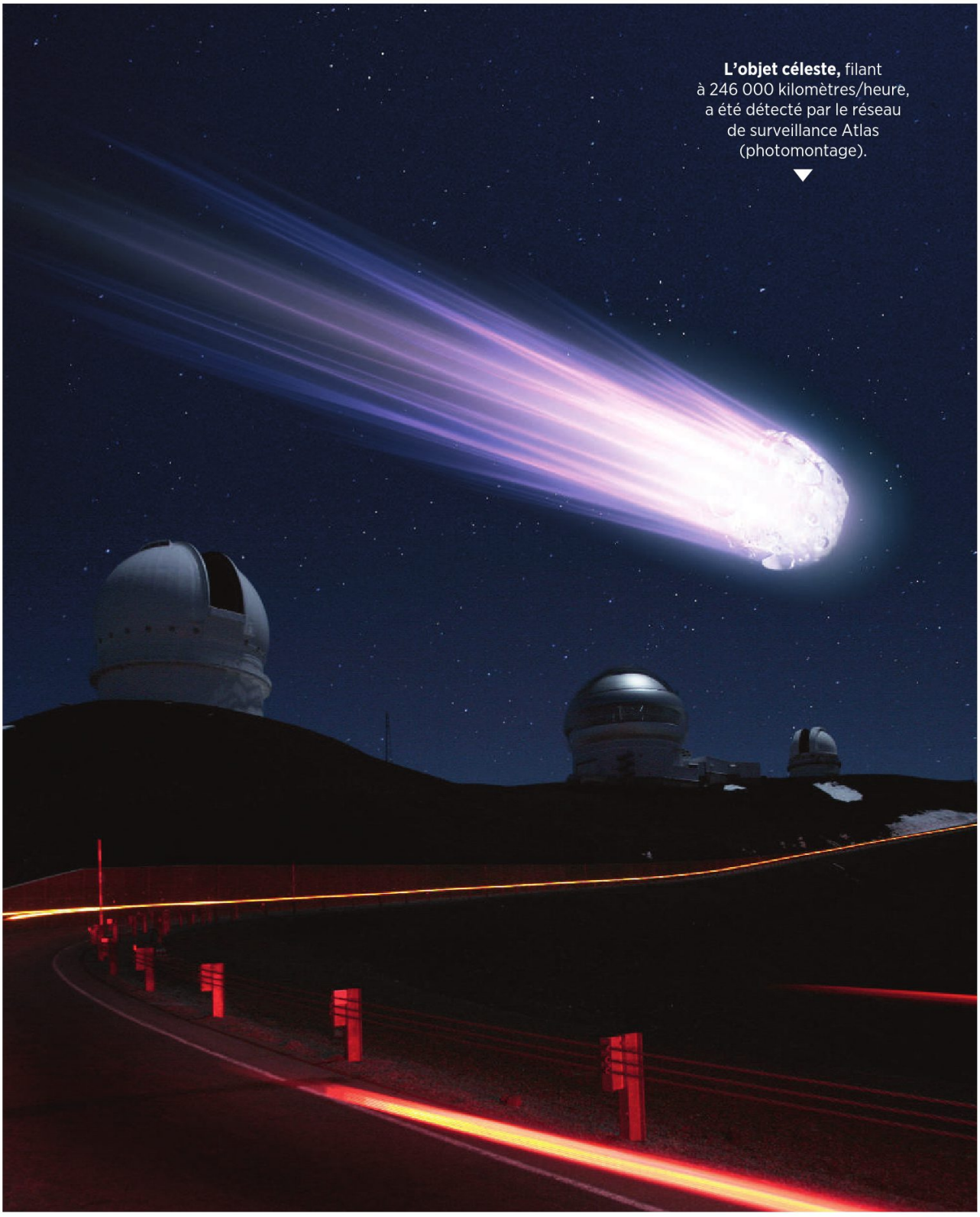
LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

Un agent IA nommé ministre !

Le 11 septembre dernier, le Premier ministre albanais, Edi Rama, a promu Diella, un agent artificiel programmé avec des techniques d'IA, au rang de ministre chargé de prendre les décisions d'attribution des marchés publics. But annoncé : lutter contre la prévarication. Intention louable s'il en est, dans un pays grevé par la corruption. Sitôt divulguée, cette nouvelle a fait le tour de la Terre. Pour autant, rien ne permet d'affirmer qu'on suivra les recommandations de Diella et qu'elles limiteront les délits de concussion. L'emploi de grands modèles de langage laisse dubitatif. Ceux-ci se fondent sur l'observation des pratiques courantes et non sur une analyse rationnelle. On ne voit pas pourquoi ils transformeraient les habitudes. Tirant avantage de la numérisation, d'autres techniques d'IA pourraient fort bien venir en aide aux pouvoirs publics, accroître la fiabilité des opérations et, par là, la confiance dans les institutions. Par un hasard du calendrier, une semaine plus tard, le 18 septembre, l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) a publié un rapport très conséquent intitulé « Gouverner avec l'IA » et portant sur le rôle de l'intelligence artificielle dans les administrations pour faciliter l'automatisation des processus, améliorer les services, limiter les fraudes, mieux former les agents, etc. Pour autant, rien ne dit que ces machines disposeront du sens de la justice, que les actions qu'elles préconiseront seront bonnes et exemptes de parti pris. Et, si elles tranchent, à la place d'un ministre, court-circuitant les responsabilités humaines, les citoyens ne disposeront plus d'aucun recours et se trouveront démunis face aux injustices. Dès lors, on peut craindre le pire ! Au fait, Diella signifie « soleil » en Albanais, et s'il éclaire… il éblouit aussi ! ■

BRUNO LÉVY

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.



L'objet céleste, filant à 246 000 kilomètres/heure, a été détecté par le réseau de surveillance Atlas (photomontage).

SHUTTERSTOCK - B.BOCCAS/NOVAPIX / BRIDGEMAN IMAGES - MONTAGE SCIENCES ET AVENIR

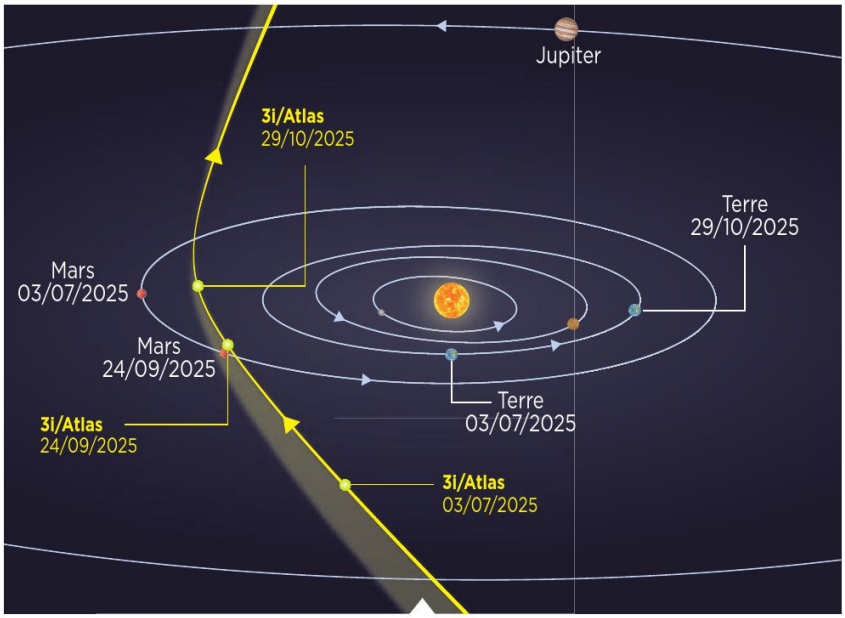
3I/Atlas
La comète de tous les records

Ce troisième objet interstellaire identifié en seulement quelques années fascine les astronomes. 3I/Atlas serait âgé d'au moins 7 milliards d'années, ce qui en ferait la plus vieille comète jamais observée. L'étude de cet objet céleste rarissime pourrait fournir des informations précieuses sur son étoile d'origine et révéler de nouveaux indices sur la formation des systèmes planétaires.

Par Franck Daninos

Le 29 octobre, une comète venue des profondeurs de la galaxie s'approchera à 210 millions de kilomètres du Soleil entre les orbites de la Terre et de Mars. Sa vitesse sera alors faramineuse : 246 000 kilomètres/heure, faisant de ce corps glacé la comète la plus rapide et la plus énergétique observée à ce jour ! Elle reprendra ensuite son périple en s'éloignant de notre étoile, passant en mars 2026 à proximité de Jupiter et en décembre de Saturne jusqu'à s'échapper du Système solaire pour ne plus jamais y revenir. Entre-temps, et pendant près d'un an et demi, les astronomes auront les yeux rivés sur cet objet céleste rarissime : une comète formée auprès d'une autre étoile que la nôtre qui fournira *« des informations extrêmement précieuses sur son système stellaire d'origine »*, s'émerveille Olivier Hainaut, de l'Observatoire européen austral (ESO). Dénommé 3I/Atlas, c'est seulement le troisième objet interstellaire identifié pour le moment, après 1I/'Oumuamua en 2017 et 2I/Borisov en 2019. Or, ce nouvel intrus *« cumule les superlatifs et se distingue déjà fortement de ses prédécesseurs »*, s'ébahit l'astronome, sachant que les observations les plus intéressantes sont peut-être à venir.

La découverte de 1I/'Oumuamua (« I » pour interstellaire, 'Oumuamua signifiant « messager » en langue hawaïenne) constitua un énorme coup de chance. Ce petit objet peu lumineux d'environ 100 mètres de longueur était très proche du seuil de détection de l'instrument qui l'a repéré — l'observatoire Pan-starrs (Panoramic survey telescope and rapid response System) à Hawaii (États-Unis). *« Il est passé au bon endroit et au bon moment. Trois jours plus*



BRUNO BOURGEOIS

La comète 3I/Atlas a été identifiée alors qu'elle se trouvait à 4,4 unités astronomiques du Soleil (1 UA correspond à la distance Terre-Soleil, soit 150 millions de km). Le 29 octobre, au moment de son périhélie, elle sera de l'autre côté de notre étoile par rapport à la Terre.

tôt ou plus tard, Panstarrs l'aurait probablement manqué », rappelle Olivier Hainaut. Sa trajectoire hyperbolique et sa vitesse très élevée (95 000 km/h) trahissaient son origine extrasolaire. Mais 'Oumuamua ne ressemblait pas du tout à ce que les scientifiques imaginaient. La naissance d'un système stellaire engendre en effet des milliards de petits corps qui n'ont pas pu s'agglomérer pour former des planètes : des astéroïdes d'une part, composés de roches et de métaux, dans les régions internes relativement chaudes ; des comètes d'autre part, mélanges de poussières et de glaces gravitant dans des zones bien plus froides et éloignées. « *Mais les comètes sont probablement 1000 fois plus nombreuses que les astéroïdes. Et parce qu'elles évoluent dans les régions externes, elles sont éjectées plus facilement dans l'espace interstellaire par des perturbations causées par des planètes géantes ou les étoiles voisines* », explique Nicolas Biver, de l'observatoire de Paris. Si les astronomes espéraient détecter depuis des dizaines d'années de tels astres, ils s'attendaient ainsi « *avec une probabilité supérieure à 99 %* » à ce que ce soient des comètes, signale l'expert. Or, 'Oumuamua ne présentait ni atmosphère (appelée aussi « coma »), ni queue de poussières que les comètes produisent lorsque leurs glaces se réchauffent en s'approchant d'une étoile. Ce premier visiteur se comportait donc plutôt comme un astéroïde… ayant une forme très allongée qui plus est, ressemblant à une galette ou un cigare ! Repéré alors qu'il s'éloignait déjà du Soleil, ce mystérieux voyageur n'a été observé que pendant une vingtaine de jours. « *On n'a recueilli presque aucune information sur sa composition, si bien que les hypothèses concernant sa nature sont pratiquement invérifiables,* reconnaît Nicolas Biver. *La mise en évidence d'une petite accélération sur sa trajectoire pourrait s'expliquer cependant par un dégazage de type cométaire à un niveau indétectable par nos instruments.* »

NICOLAS BIVER

« En deux mois, nous avons recueilli davantage d'informations sur 3I/Atlas qu'après un an d'observations de 2I/Borisov »

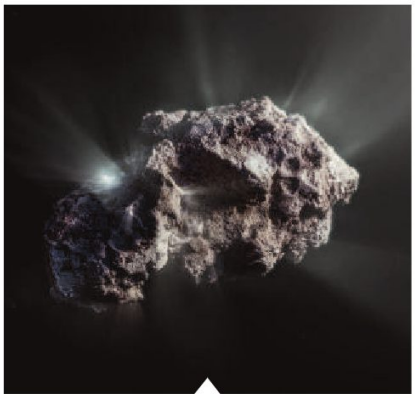
Nicolas Biver, chercheur au Lira, Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique (CNRS/observatoire de Paris)

À partir de 2026, le nombre de détections devrait bondir

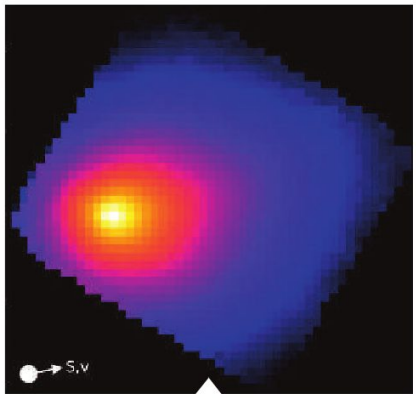
2I/Borisov était beaucoup plus conforme aux attentes des chercheurs. Découvert par l'astronome amateur ukrainien Guennadi Borisov, il était entouré d'un nuage de poussières et de gaz ne laissant aucun doute sur sa nature cométaire. Ce deuxième spécimen, qui mesurait 1 km de diamètre et traversait notre système solaire à 110 000 km/h, a été détecté en outre avant le périhélie — point de l'orbite où l'objet est au plus proche du Soleil. Il sera examiné ainsi pendant dix mois par de nombreux observatoires comme Hubble ou le Very large telescope (VLT). En analysant la lumière émise par le halo, ils détecteront du carbone diatomique, du monoxyde de carbone, du cyanogène et de la vapeur d'eau. « *Des molécules qu'on retrouve dans toutes les comètes du Système solaire,* souligne Emmanuel Jehin, de l'université de Liège (Belgique). *Il était fascinant de constater, grâce à 2I/Borisov, que des mécanismes similaires étaient à l'œuvre dans d'autres systèmes stellaires pour former des petits corps et fabriquer les planètes.* » Si les ingrédients de base paraissaient identiques, les scientifiques s'attendaient néanmoins à ce que les proportions fluctuent selon les spécificités du système d'origine. Par rapport à la moyenne des comètes solaires,

ESO/M. KOMMESSER, NASA/JWST

'Oumuamua est le premier objet interstellaire observé, en 2017, durant 20 jours. Long de 100 m, sa vitesse était de 95 000 km/h.



Borisov, repéré en 2019, mesurait 1 km de diamètre. Il a traversé notre système solaire à 110 000 km/h. Il sera observé 10 mois.



Atlas a été découvert le 1er juillet. Avec une vitesse de 246 000 km/h et un diamètre estimé à 5 km, il aurait 7 milliards d'années.

2I/Borisov expulsait ainsi trois fois plus de monoxyde de carbone — un gaz qui se solidifie à très basse température. Il proviendrait ainsi d'une étoile plus froide et moins lumineuse que le Soleil, telle une naine rouge.

Avec seulement deux spécimens dont un très étrange, il était toutefois très difficile de tirer des conclusions générales. Au début de cet été, *« nous nous demandions encore si la découverte de 1I/'Oumuamua et 2I/Borisov ne résultait pas d'un heureux hasard et s'il ne fallait pas attendre une ou plusieurs décennies avant d'en détecter un nouveau »*, témoigne Emmanuel Jehin. La découverte, le 1er juillet, d'un troisième exemplaire par le réseau de surveillance Atlas (Asteroid terrestrial-impact last alert system) a clos le débat. *« Nous savons désormais que les systèmes de détection automatique comme Panstarrs ou Atlas ont franchi une limite et sont suffisamment performants pour débusquer ces objets »*, se réjouit le chercheur. Sans compter qu'un instrument aux capacités extraordinaires, l'observatoire Vera-Rubin situé au Chili, révolutionnera à partir de janvier 2026 le domaine. Grâce à son miroir de 8,4 mètres de diamètre et sa caméra grand champ de 3,2 milliards de pixels, il photographiera tous les trois jours la totalité du ciel austral avec une sensibilité inouïe. De quoi déceler *« entre cinq et 50 objets interstellaires pendant les dix années d'exploitation du Vera-Rubin,* espère Olivier Hainaut. *Et établir des statistiques solides sur le nombre, la composition et la provenance de ces astres. »*

Plus le corps interstellaire est rapide, plus il est âgé

« 3I » fournit déjà un fabuleux avant-goût des découvertes à venir. *« Il produit tellement de poussières que le noyau est très difficile à visualiser »*, indique Olivier Hainaut. Selon les estimations actuelles, il mesurerait toutefois jusqu'à 5 km de large ! Ce qui est certain, c'est que sa vitesse est deux fois plus élevée que celle des deux premiers touristes intersidéraux, fournissant des indications très intéressantes sur son origine. *« Il existe une corrélation entre la vitesse d'un corps interstellaire et son âge,* explique le chercheur. *Plus il est rapide, plus il est probable qu'il circule depuis longtemps dans la galaxie, en accélérant à chaque fois qu'il passe dans le voisinage d'une étoile. »* Selon une étude publiée en juillet par une équipe britannique, 3I/Atlas serait ainsi âgé d'au moins 7 milliards d'années. Soit trois de plus que le Système solaire, ce qui ferait de 3I/Atlas la plus vieille comète jamais observée ! Un second indice plaide pour un objet très ancien. En extrapolant sa trajectoire et en remontant le temps, on peut se faire une idée en effet de l'endroit d'où il vient : une région

HYPOTHÈSE

L'idée loufoque du vaisseau extraterrestre

Après avoir soutenu, dès 2018, que le premier objet interstellaire 1I/'Oumuamua serait une sonde extraterrestre, l'astrophysicien Avi Loeb de l'université Harvard (États-Unis) récidive. Dans une étude publiée le 16 juillet, il avance que ce troisième visiteur pourrait être un objet « *technologique* », « *potentiellement hostile* », venu nous épier — une théorie abondamment relayée par les réseaux sociaux. Parmi les arguments évoqués : les dimensions étonnement grandes de 3I/Atlas, sa trajectoire quasiment parallèle à l'écliptique, ses passages tout près de Vénus, Mars, Jupiter... et le fait qu'il se situera de l'autre côté de la Terre au moment du périhélie — position idéale pour rester caché. « *3I/Atlas ressemble à une comète, se comporte comme une comète, donc c'est une comète...*, rappelle Olivier Hainaut. *Il faut garder à l'esprit que les explications les plus simples reposant sur le moins d'hypothèses possible sont généralement les meilleures. »*

JOAN-PAU SANCHEZ CUARTIELLES

3 QUESTIONS

JOAN-PAU SANCHEZ CUARTIELLES

CHERCHEUR À L'INSTITUT SUPÉRIEUR DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE À TOULOUSE

« La mission Comet Interceptor se focalisera sur les comètes de notre système solaire »

La comète interstellaire 3I/Atlas peut-elle être rejointe et étudiée de près par une sonde spatiale ?
Il n'existe aujourd'hui aucune sonde conçue pour une telle expédition. Mais une mission, Comet Interceptor, est en développement au sein de l'Agence spatiale européenne : elle sera lancée en 2029 pour rejoindre le point Lagrange L2 à 1,5 million de kilomètres de la Terre, afin d'attendre une cible puis fondre sur elle.

Si elle était opérationnelle, pourrait-elle atteindre 3I/Atlas ?
Non. Pour croiser 3I/Atlas au point d'interception optimal, l'engin aurait dû s'élancer 825 jours auparavant — soit le 2 août 2023. Or, 3I/Atlas se trouvait alors à plus de 4 milliards de kilomètres du Soleil, bien au-delà des capacités de détection de nos télescopes ! Pour que Comet Interceptor atteigne un objet interstellaire dans les années à venir, il faudra que celui-ci passe à moins de 180 millions de kilomètres de notre planète.

D'autres cibles sont-elles envisagées ?
Le survol d'un objet interstellaire n'est pas l'objectif prioritaire de Comet Interceptor. Les cibles principales concerneront des comètes venant des régions les plus éloignées de notre étoile et qui s'approcheraient du Soleil pour la première fois. Des astres qui refléteront la composition originelle du Système solaire. ■

Propos recueillis par F. D.

de la galaxie à la fois centrale et appartenant à ce que les astronomes appellent le « disque épais ». Contrairement au disque mince qui contient la majorité des étoiles, relativement jeunes de surcroît à l'instar du Soleil, cette structure est peuplée d'astres épars âgés de 8 à 12 milliards d'années. *« Ils sont en outre moins riches en éléments lourds comme le fer ou le silicium — jusqu'à dix fois moins que le Soleil,* précise Emmanuel Jehin. *L'étude de 3I/Atlas pourrait fournir ainsi des données inestimables sur ces systèmes très anciens et leurs capacités à former des planètes, notamment rocheuses. »*

Grâce au VLT, à Hubble et surtout à l'observatoire spatial James-Webb, une variété de substances ont d'ores et déjà été détectées dans cette comète nomade, possible témoin des premiers âges de la galaxie : de l'eau gazeuse et solide, du monoxyde et dioxyde de carbone, du sulfure de carbonyle, de l'acide cyanhydrique, du cyanogène, du nickel et du fer. *« En deux mois, nous avions recueilli davantage d'informations sur 3I/Atlas qu'après un an d'observations de 2I/Borisov — notamment en raison du James-Webb qui n'existait pas à l'époque »*, relève Nicolas Biver. Là encore, les molécules identifiées sont présentes également dans les comètes locales. Mais la quantité de dioxyde de carbone dépasse cette fois toutes les proportions connues. Elle est huit fois plus importante que la vapeur d'eau, alors que ce rapport se situe entre 0,2 et 1 pour nos comètes à la même distance du Soleil. Cette prédominance suggère que 3I/Atlas se serait formé dans un environnement très froid contenant des quantités importantes de carbone et d'oxygène. *« Elle pourrait résulter aussi de processus chimiques encore inconnus, produits à la surface de la comète pendant son périple dans le milieu interstellaire,* se demande Emmanuel Jehin. *Enfin, il est possible que l'eau, du fait de ce long voyage, mette plus de temps à dégeler et se transformer en vapeur. Nous n'aurons une image claire qu'après le périhélie, quand l'inertie thermique aura eu le temps de bien chauffer les glaces internes. »*

Les observations reprendront après le périhélie

Pendant le périhélie, 3I/Atlas sera hélas de l'autre côté du Soleil par rapport à la Terre. Les télescopes au sol et dans l'espace ne pourront donc pas observer cette étape clé où le dégazage est maximal et l'enveloppe lumineuse la plus développée. *« C'est à cet instant, aussi, qu'une comète a le plus de chance de se fragmenter sous l'effet d'un choc thermique, mettant à nu l'intérieur. On ne sait pas ce qu'il adviendra pour 3I/Atlas, mais s'il doit se passer quelque chose, ce sera à ce moment-là »*, trépigne Olivier Hainaut. Des sondes interplanétaires, tels les orbiteurs martiens Maven, MRO et Mars Express, ou le satellite Juice qui fait route vers Jupiter, observeront peut-être une partie du spectacle, mais *« leurs instruments n'ont pas été conçus pour analyser la composition d'une comète »*, souligne l'astronome. Dès la mi-novembre, Hubble puis le James-Webb ainsi qu'une armada de télescopes terrestres reprendront toutefois leurs observations, sans doute jusqu'à fin 2026. *« Nous espérons détecter alors une panoplie de composés comme de l'ammoniac, du sulfure d'hydrogène et des molécules organiques »*, s'enthousiasme Nicolas Biver. De quoi en apprendre davantage sur cet astre venu d'ailleurs, préciser son origine et révéler peut-être de nouveaux secrets sur la formation des systèmes planétaires. ■

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

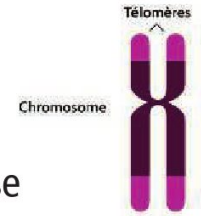
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

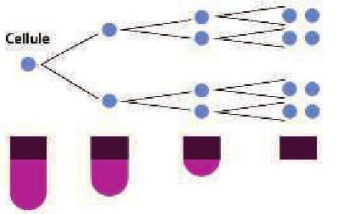
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

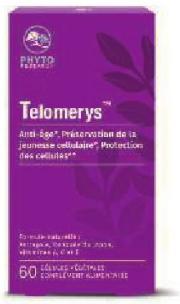
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Des conseils ?
Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 84 23 35 83** et sur www.telomerys.com

Un algorithme prédit les blessures des rugbymans

Au Racing 92, club francilien de rugby, un outil informatique inédit est en développement. Il permettra de réduire les risques de blessure grâce à l'analyse de nombreuses données et d'adapter l'entraînement à la condition physique des joueurs. Reportage.

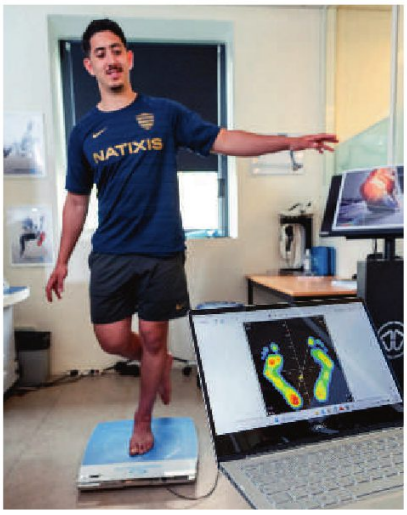
« *Le Top 14 est un championnat hypercompétitif. À part Toulouse et Bordeaux, qui semblent avoir une longueur d'avance, le reste du championnat se joue généralement à quelques points près. Et l'une des façons d'arriver à gagner, c'est d'avoir son effectif au complet. La gestion des blessures est vraiment un axe stratégique majeur pour les clubs* », explique en préambule Philippe Rouch, professeur des universités à l'Institut de biomécanique humaine Georges-Charpak, à Paris. Avec des collègues de son laboratoire et de l'École polytechnique féminine (EPF) de Cachan, ils se retrouvent ce jour au Plessis-Robinson (Hauts-de-Seine) dans les locaux du Racing 92, un club historique du rugby français, pour faire un point sur un projet en cours : prédire les blessures des joueurs grâce à un algorithme.

En pleine saison du Top 14, un match à domicile est prévu ce week-end et il faut attendre que les joueurs aient fini leur entraînement pour échanger avec le staff performance (qui associe la préparation physique et le médical) et quelques joueurs. Le capitaine de l'équipe espoir du club, Naël Souid (transféré depuis notre reportage au Racing club narbonnais), vient à notre rencontre pour nous expliquer comment sont récupérées les données destinées à l'algorithme. Quatre principaux types d'informations sont récoltés : les réponses aux questionnaires d'état de forme des joueurs remplis chaque matin avant l'entraînement (niveau de stress, qualité de sommeil…), les données GPS, les scores de fatigue ressentie par les joueurs à l'issue de chaque session d'entraînement et des matchs et les données contextuelles (la date du prochain match, à domicile ou à l'extérieur, l'état du terrain, la météo…). Ces données quotidiennes sont combinées avec les données dites de « screening » récoltées de façon plus occasionnelle (tests neurologiques, de mobilité, de vision…). Les données GPS sont recueillies grâce à des boîtiers positionnés sous le maillot des joueurs, avec un équipement identique pour tous les clubs de Top 14. Elles donnent la position des joueurs en temps réel et permettent de calculer la distance parcourue, la vitesse, l'accélération… Une quinzaine de paramètres au total entrent dans l'algo-

ZEHIRA HADDAD

« C'est le même principe que les IA d'analyse de texte et de contexte. On remplace les mots dans une phrase par de la charge physique »

Zehira Haddad, enseignante-chercheuse à l'École polytechnique féminine de Cachan, spécialiste d'IA



Un capteur GPS est installé par le chercheur Maxence Duffuler sur le maillot de Naël Souid, alors capitaine de l'équipe espoir du Racing 92. Le joueur teste chaque semaine sa posture et son équilibre sur la plateforme de stabilométrie (en haut, à droite). Il est équipé d'un protège-dents connecté pour mesurer l'exposition aux contacts (en bas, à droite).

rithme. Depuis 2024, l'organisme international World Rugby a également imposé le port de protège-dents connectés qui permettent de mesurer l'exposition aux contacts. Concernant les données de screening, les joueurs réalisent une série de tests en pré-saison (juillet-août) qui vont servir de données de référence : un passage sur une plateforme de stabilométrie qui caractérise le contrôle de l'équilibre et de la posture, un test en réalité virtuelle et une dizaine de tests sur tablette pour évaluer les performances perceptives et cognitives.

En cas de blessure, les joueurs se plient à ces évaluations toutes les semaines jusqu'à leur retour en compétition. *« Pour soigner efficacement un joueur, nous devons identifier tous les facteurs ayant abouti à la survenue de sa blessure : il y a bien évidemment les éléments liés à l'activité sportive et les antécédents de blessures du joueur, mais aussi son mode de vie, son contexte, son environnement… L'objectif est de ramener le joueur sur le terrain dans les meilleurs délais, avec un risque de récidive de blessure minimal »*, détaille Sylvain Blanchard, directeur médical et scientifique du Racing 92.

Une courbe de probabilité de blessure pour chaque joueur

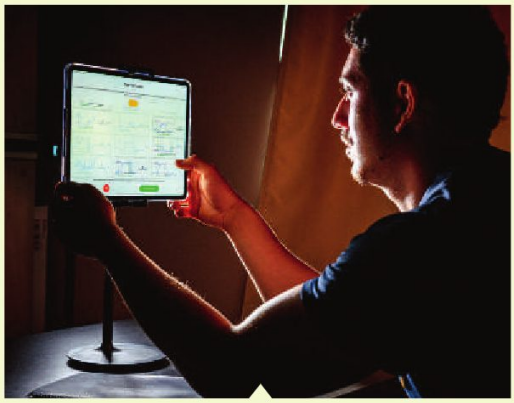
« Une des problématiques du rugby français, c'est que les clubs jouent davantage de matchs que dans les autres pays. Or, la probabilité de se blesser augmente avec le nombre de matchs », constate Philippe Rouch. En Angleterre il y a dix équipes, contre 14 en France. Et c'est encore moins pour d'autres pays.

« L'un des principaux facteurs de blessure, c'est l'accumulation de la charge de travail au cours du temps », explique le chercheur Maxence Duffuler, qui a consacré sa thèse à ce sujet. Grâce à une intelligence artificielle (IA), le modèle va analyser le jour J et les jours qui précèdent. Des allers-retours d'analyse vont permettre de détecter des variations à la hausse ou à la baisse de la charge. Le modèle est capable de le faire sur plusieurs paramètres simultanément. *« C'est le même principe que les IA d'analyse de texte et de contexte. On remplace les mots dans une phrase par de la charge physique »*, explique Zehira Haddad, enseignante-chercheuse à l'EPF spécialiste d'IA, qui a coencadré la thèse. L'algorithme donne ensuite une probabilité de blessure pour le lendemain. Démonstration par l'image : Maxence Duffuler affiche la courbe de probabilité de blessure qui correspond à l'un

OUTILS

Les nouvelles technologies pour améliorer le jeu

La croissance exponentielle des données collectées et l'essor de l'IA sont tels que tous les clubs sont en train de faire évoluer leurs pratiques et d'intégrer des compétences spécifiques de sport scientist *et de* data scientist », observe Sylvain Blanchard, directeur médical et scientifique du Racing 92. Aussi, dans ce club, on envisage l'IA au-delà de la santé des joueurs. Elle pourrait notamment aider les analystes vidéo à détecter et coder automatiquement certaines actions de jeu et leur libérer du temps pour d'autres tâches. Autre projet, qui fait l'objet d'une thèse au sein du club : un simulateur de touche dans un casque de réalité virtuelle. Il permet de se placer dans le rôle du lanceur, d'un sauteur ou de l'un de ses soutiens et de s'entraîner de façon réaliste mais sans contrainte physique, notamment pour maintenir la stimulation des joueurs blessés. Enfin, un outil d'IA permettra de détecter automatiquement sur les vidéos la réussite et les trajectoires des tirs de transformation.



Le joueur Naël Souid effectue des tests (neurologiques, de vision, de mobilité) à l'aide d'une application.

des joueurs. Elle augmente sur plusieurs jours. Et, effectivement, le joueur s'est blessé lorsque la probabilité de blessure était proche de 100 %.

Conserver un regard critique sur les algorithmes

Dans cet algorithme — qui n'est pas encore utilisé par le club au quotidien car il est en phase d'apprentissage et d'amélioration —, un module permet de comprendre quels paramètres ont exercé une influence sur la probabilité de blessure (négativement et positivement), pour interpréter la prédiction. *« Lorsque nous serons en phase d'utilisation du dispositif, nous pourrons ainsi voir s'il est possible d'intervenir sur les facteurs identifiés »*, explique Sylvain Blanchard. Pour certains paramètres, comme l'âge du joueur ou les données environnementales, il n'est bien sûr pas possible d'agir. Mais dans d'autres cas, l'adaptation de l'entraînement peut permettre d'inverser la tendance. Par exemple, si un joueur a parcouru trop de distance de course, il est possible de réduire la séance à venir. Ou si le joueur n'a pas réalisé suffisamment de *sprints*, il peut bénéficier d'un complément ciblé en entraînement.

« J'ai commencé par un exemple où cela fonctionne bien », explique Maxence Duffuler, qui enchaîne sur une courbe avec de grosses incohérences. La probabilité de blessure augmente puis diminue et ne se trouve pas corrélée avec une blessure observée. *« C'est une aide pour identifier de possibles situations à risque et adapter nos réponses. Mais elle peut avoir tort de temps en temps et il faut donc conserver un regard très critique sur ces algorithmes »*, conseille Sylvain Blanchard.
« Grâce aux différentes données récoltées, nous avons 28 paramètres d'entrée pour 42 joueurs sur deux saisons. Pour un total de 12 000 séquences. Ça semble beaucoup, mais pour de l'IA c'est peu », commente Maxence Duffuler.
« L'IA fonctionne bien quand il y a des volumes de données démentiels. Quand on gère de plus petits volumes de données, il faut être subtil pour les contextualiser », abonde Philippe Rouch.
« C'est un outil très prometteur. Nous rongeons notre frein pour qu'il atteigne un certain niveau de maturité. Si nous prenons en considération trop tôt ces analyses pour adapter notre gestion des joueurs, nous allons créer des biais qui perturberont l'apprentissage et donc la fiabilité du modèle », indique Sylvain Blanchard, précisant qu'il pense l'utiliser lors de la prochaine saison.
Mais alors, qui prendra la décision de mettre le joueur à l'arrêt si la courbe de probabilité de blessure se rapproche de 100 % ? Et ce, même si celui-ci et l'équipe médicale auront essayé de rectifier les problèmes soulevés par le programme ? *« Le médecin doit prendre ses responsabilités s'il considère que le risque de blessure est trop important,* explique Sylvain Blanchard. *Mais il peut aussi estimer que le joueur est apte à s'entraîner voire disputer un match, à condition de définir les adaptations et limites nécessaires, avec l'adhésion du joueur et en étroite collaboration avec les préparateurs physiques et les entraîneurs. »* L'humain aura toujours le dernier mot. ■ **Léna Hespel**

Photos : François Guenet / Divergence pour Sciences et Avenir

EXCURIO - CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX

L'expérience immersive « Les derniers remparts » plonge le visiteur dans la cité médiévale de Carcassonne au début du XIVe siècle.

La réalité virtuelle en toute liberté

Marcher le long des remparts de la Carcassonne médiévale ou sillonner les ruelles de Pompéi coiffé d'un casque de réalité virtuelle… Ces « immersions en déambulation » se multiplient grâce à des technologies plus puissantes et plus compactes.

C'est une séquence assez grisante dans l'expérience de réalité virtuelle « Les derniers remparts », qui se déroule dans la Carcassonne de 1304. Arrivé sur un marché au cœur de la cité médiévale, vous voilà libre d'aller où vous voulez. Vous pouvez vous pencher sur l'étal d'un marchand d'épices, vous approcher de l'enclos aux cochons, revenir sur vos pas vers le vendeur de pommes, tandis que les voix alentour et les sons ambiants varient en intensité selon votre orientation.

En réalité virtuelle, il n'est encore pas si fréquent de pouvoir déambuler ainsi, en s'affranchissant un temps de toute narration. Pourtant, il semble déjà loin le temps où l'on profitait d'un environnement simulé à 360° en restant assis, visiocasque sur la tête. Cette approche statique existe toujours, bien sûr. Mais une combinaison d'évolutions technologiques et de procédés narratifs favorise le développement de ce que le studio Excurio, coproducteur des « Derniers remparts » avec le Centre des monuments nationaux (CMN), appelle des « expéditions immersives ». Le concept ? Des dizaines d'utilisateurs équipés de casques arpentent une salle selon un parcours calculé pour leur éviter des collisions avec les murs ou les autres personnes. Dans ce qui s'apparente à de véritables histoires, scénarisées, un personnage sert généralement de guide à l'utilisateur.

L'ambition avouée est certes de retrouver la force de l'expérience collective d'une séance de cinéma. Mais en y ajoutant une implication physique, la sensation de réellement progresser dans les couloirs de la grande pyramide de Kheops (« L'horizon de Kheops »), les rues de Pompéi (« Pompeii, the last gladiator »), ou de descendre dans la salle

des machines du *Titanic* (« Titanic, le rêve englouti »). Avec pour conséquence de limiter les vertiges voire les nausées, plus fréquentes dans les expériences statiques. En effet, lorsqu'un utilisateur visualise son déplacement dans le casque alors qu'il est assis dans un fauteuil, son oreille interne ne comprend pas et cette dissonance cognitive crée un malaise, le mal des transports ou cinétose. *« En déambulation libre, si je fais un pas, si je me baisse, mes mouvements correspondent à ce que je vois dans le casque et le cerveau ne se pose plus de questions »*, explique Vincent Guttmann, directeur de Small Creative, coproducteur de « Versailles, les jardins disparus du Roi-Soleil ».

Des progrès en matière de narration et de scénographie

Il y a quelques années, de tels dispositifs nécessitaient de porter dans un sac à dos un ordinateur relié au visiocasque. Désormais, ces derniers embarquent la capacité de calcul et communiquent sans fil *via* un réseau Wi-Fi local, avec un ordinateur hébergeant la plateforme technique. Plus besoin, non plus, de capteurs infrarouges fixés sur des mâts pour suivre la position et les mouvements des casques dans l'espace. *« Aujourd'hui, ce sont les casques qui détectent leur propre position, avec des caméras qui scrutent l'environnement, notamment grâce à des marqueurs sur les murs,* explique Fabien Barati, cofondateur d'Excurio. *Notre logiciel synchronise ensuite l'immersion selon les positions et orientations des utilisateurs. »*

SANDRA GARBATI

« Aujourd'hui, ce sont les casques qui détectent leur propre position, avec des caméras qui scrutent l'environnement »

Fabien Barati, cofondateur d'Excurio

POUR EN SAVOIR PLUS

Démonstration du dispositif immersif sur « Pompeii, the last gladiator », du studio espagnol UniVRse :
▸ sciav.fr/945immersif

Les salles accueillant ces immersions en déambulation, comme les espaces Eclipso, sont ainsi couvertes de motifs abstraits noirs, gris, blancs. Ils sont visibles de loin et offrent beaucoup de contraste pour garantir une bonne localisation du casque, même en cas de forte affluence. Small Creative, dont l'un des modèles économiques consiste à aménager des espaces temporaires dans des lieux destinés à l'origine à d'autres usages, doit parfois s'adapter. *« Quand tous les murs sont blancs, il faut ajouter des panneaux spéciaux ou utiliser du scotch de peintre pour créer des repères,* raconte Vincent Guttmann. *Mais pour des démos dans un palais en Italie, les tableaux accrochés partout suffisaient, ils donnaient assez de contrastes et de formes aléatoires. »*

D'autres progrès ont été faits en matière de grammaire narrative et de scénographie, en empruntant au cinéma, au théâtre ou au spectacle vivant. *« Dans le jeu vidéo, il existe des mondes ouverts dans lesquels, bizarrement, les joueurs font tous la même chose,* ajoute-t-il. *C'est parce qu'ils sont en réalité très bien guidés sans qu'ils s'en rendent compte. Nous avons appris à faire la même chose. »*

Des casques encore limités en puissance de calcul et mémoire

Pour ludique qu'elles apparaissent, ces immersions s'épanouissent particulièrement dans le secteur des lieux patrimoniaux ou des institutions scientifiques et muséales (Muséum national d'histoire naturelle, Louvre d'Abou Dhabi, château de Versailles). Le Centre des monuments nationaux (CMN) multiplie les expérimentations, où les réali-

EXPÉRIMENTATIONS

Le patrimoine versant high-tech

Depuis un premier support de réalité augmentée à l'abbaye de Cluny en 2010, le Centre des monuments nationaux (CMN) a décliné l'idée au Mont-Saint-Michel ou au château de Vincennes et explore nombre de pistes. De l'immersion sonore spatialisée, à l'hôtel de la Marine (Paris), à la modélisation par photogrammétrie de la grotte ornée de Font-de-Gaume, en passant par le château d'If en réalité virtuelle pour des résidents d'Ehpad, ou une visite pour un public scolaire du site antique de Glanum en utilisant le moteur de jeu vidéo Unreal. « Les derniers remparts », cette année, est la première immersion en déambulation du CMN. Après la création d'une mission stratégie et prospective en 2014, l'établissement public a ouvert en 2018 l'Incubateur du patrimoine. *« C'est une cellule d'innovation ouverte qui nous permet de mener des expérimentations avec des start-up »*, décrit Abla Benmiloud-Faucher, du CMN. On y trouve des spécialistes d'immersion comme des projets d'éclairage, de végétalisation ou de récupération de matériaux.

EXCURIO - VR FUTURE

Les marqueurs aux murs et au sol servent à connaître la localisation et l'orientation de l'utilisateur dans une salle de réalité virtuelle, ici au Müzeverse à Istanbul (Turquie), ouvert fin 2024 avec une exposition sur les pyramides égyptiennes.

tés augmentée et virtuelle tiennent une place de choix (*lire l'encadré ci-contre*). *« C'est un complément à nos parcours de visite,* note Abla Benmiloud-Faucher, cheffe de mission de la stratégie, de la prospective et du numérique au CMN. *Cela peut toucher tous les publics, pas seulement les jeunes, contrairement à un* a priori *erroné, et y compris un public hors les murs, qui ne pourrait pas venir physiquement dans nos monuments.* »

Le concept est cependant loin d'avoir livré tout son potentiel. S'ils sont fiables, les casques sont encore limités en puissance de calcul et en mémoire, empêchant notamment de restituer des contenus photoréalistes. C'est d'ailleurs pourquoi le studio Small Creative a opté pour un style graphique simplifié, riche en texture mais proche de la peinture ou du dessin.

« Je crois beaucoup à la réalité virtuelle, mais elle n'a pas encore le niveau de maturité de la réalité augmentée, estime Abla Benmiloud-Faucher. *D'une part, en raison de coûts importants, même s'ils vont baisser avec l'intelligence artificielle, d'autre part à cause de contraintes de diffusion : il n'existe pas encore de standard de diffusion dans les salles.* » À l'heure actuelle, les créations du studio espagnol UniVRse et celles d'Excurio ne peuvent ainsi pas être proposées dans les mêmes endroits. C'est pour favoriser l'émergence d'un standard qu'Excurio a ouvert cette année sa plateforme logicielle à d'autres studios, qui vont pouvoir l'utiliser pour développer leurs propres expériences.

Accentuer encore l'implication de l'utilisateur est un autre axe de développement. *« Nous travaillons beaucoup sur les interactions, les manipulations, tout ce qui peut avoir un impact sur l'environnement,* détaille Fabien Barati. *Cela peut être des personnages qui nous parlent, des animaux ou des éléments de la nature qui réagissent quand on s'approche d'eux.* » En revanche, renforcer ce sentiment de présence dans le virtuel par des interfaces tactiles est encore un casse-tête, et pas uniquement sur le plan technique : elles impliquent d'équiper les gens d'accessoires supplémentaires (comme des gants haptiques), de leur en expliquer le fonctionnement, de les assister. En 2019, la chorégraphe Blanca Li s'est associée au studio français Backlight pour une expérience collective de danse en réalité virtuelle, « Le bal de Paris ». Problème : il fallait dix personnes pour barder dix participants de capteurs. Or, aussi puissante que soit une technologie, son adoption dépendra de sa simplicité d'usage. Voire de sa similarité avec des usages déjà familiers. Depuis quelques mois, la plateforme d'Excurio permet de diffuser jusqu'à trois « expéditions immersives » simultanément dans la même salle. Réalité virtuelle ou pas, le concept bien connu du multiplexe n'est pas très loin. ■

Arnaud Devillard

PRATIQUE

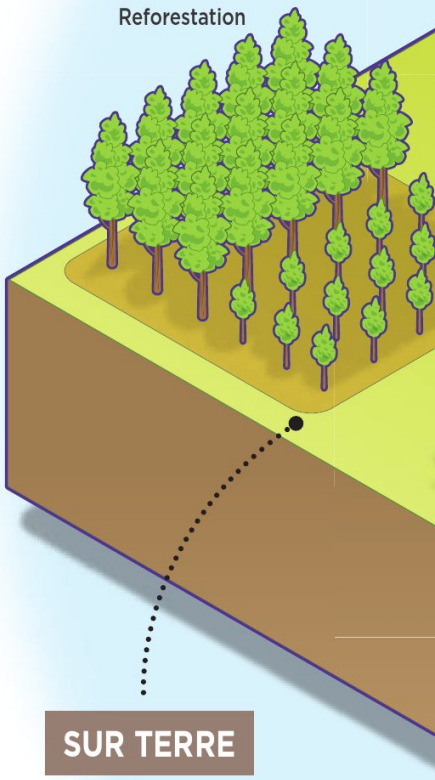
4 immersions à tester

- **Les derniers remparts** et **Mondes disparus,** espaces Eclipso (Bordeaux, Lyon, Nantes, Paris), 800 m², 45 minutes, à partir de 24,50 €
- **Les jardins disparus du Roi-Soleil,** château de Versailles, pavillon d'Orléans, 100 m², 25 minutes, 15 €
- **Éternelle Notre-Dame,** espace Grande Arche, Paris-La Défense, 500 m², 45 minutes, 30,99 €

La science peut-elle sauver le climat ?

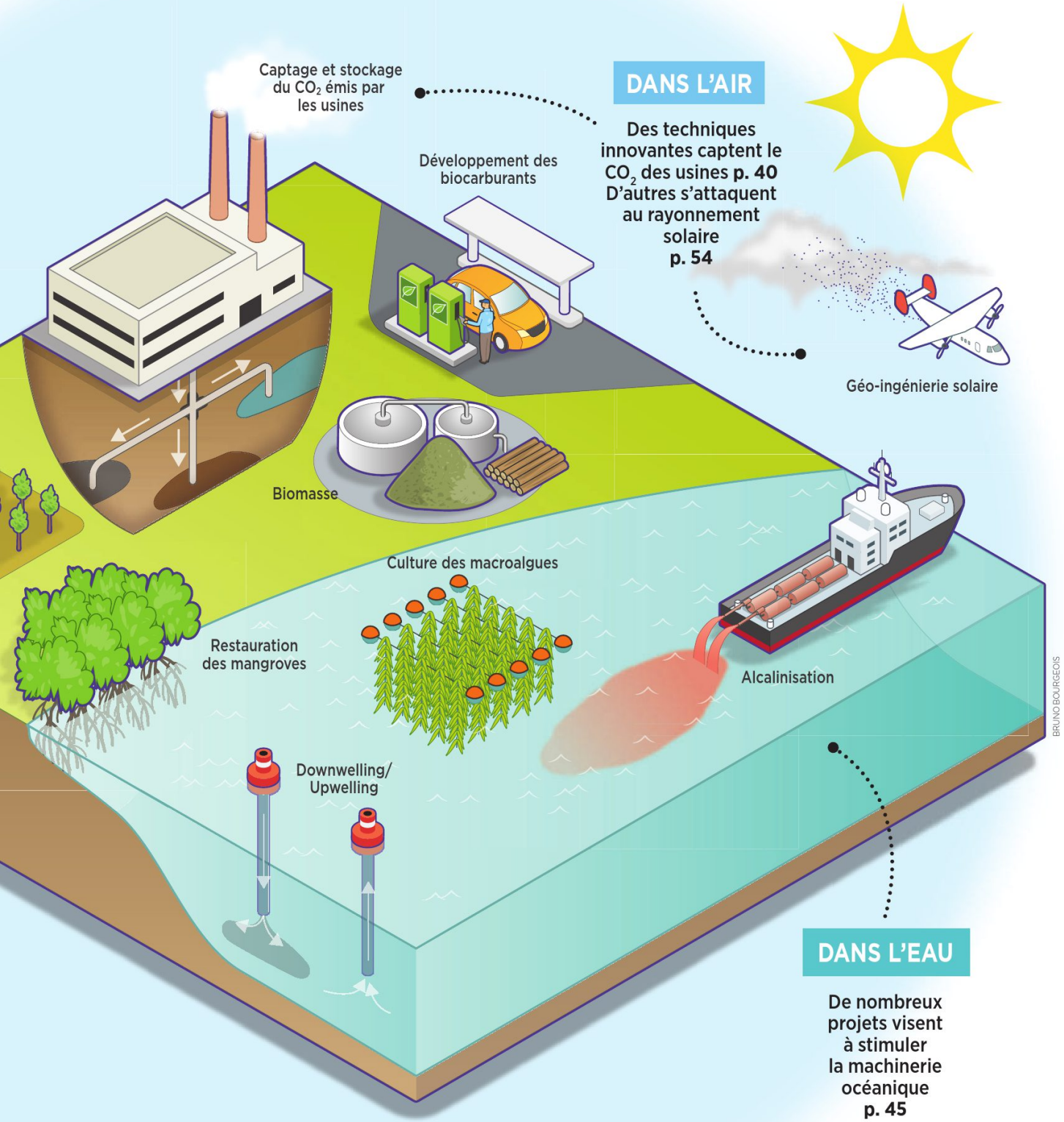
Contre le réchauffement climatique, les solutions d'atténuation seront au cœur des débats de la COP30, en novembre au Brésil. Amplification des puits de carbone naturels, sur terre comme en mer, développement des techniques de captage et de stockage du CO_2... La géo-ingénierie suscite des espoirs et plus de peurs encore. Mais il faut compter avec elle.

Dossier réalisé par
Loïc Chauveau, Fabrice Nicot
et Sylvie Rouat



SUR TERRE

La priorité est à la restauration des milieux naturels, la mise en valeur de la biomasse et le développement des bio-carburants
p. 49



BRUNO BOURGEOIS

CONTEXTE

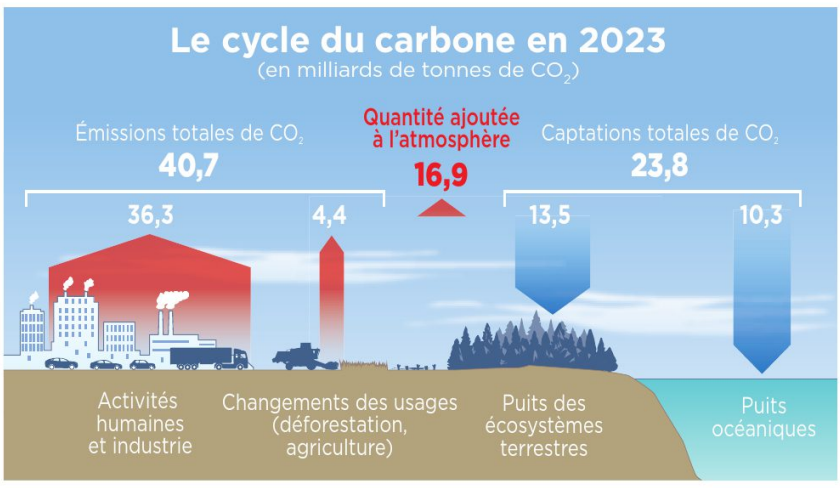
***Le 2 octobre, l'Académie des sciences a publié un rapport inédit sur la géo-ingénierie climatique, soit un ensemble de méthodes qui suscitent aujourd'hui* « un intérêt croissant, mais également des controverses dans un contexte de fortes incertitudes. »** ***Pour le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), ces solutions sont* « inévitables »** ***si l'on veut limiter l'augmentation de la température globale à 1,5 ou 2 °C au-dessus des températures préindustrielles. Aux côtés des incontournables efforts de réduction des émissions à la source, ces solutions visent à compenser les émissions d'activités difficiles à décarboner (cimenteries, sidérurgie…). Mais derrière le mot de géo-ingénierie se cachent des approches multiples, allant du piégeage des émissions à la source au retrait du CO_2 de l'atmosphère directement ou par réactions biologiques ou physiques pour le stocker dans les sols, la biomasse ou les océans. Plus controversées encore, les méthodes de modification du rayonnement solaire visent à refroidir artificiellement la planète. Ces pistes séduisent, mais elles posent aussi* « des questions éthiques, économiques et sociétales, *souligne Valérie Masson-Delmotte, membre du Haut Conseil pour le climat.* En cas de déploiement unilatéral, cela pourrait engendrer des risques politiques, voire des conflits entre pays. De plus, cela fait craindre une dépendance technologique et un détournement des ressources au détriment de la décarbonation. »** ■ **S. R.**

DANS L'AIR

Comment capter et stocker le CO_2

Avec 65 installations opérationnelles dans le monde et plus de 600 projets en développement, la technologie de captage et de stockage de CO_2 commence à se déployer. Mais les contraintes techniques et économiques pèsent encore.

Le 25 août 2025, le navire *Northern Pioneer* a livré ses premiers mètres cubes de CO_2 au terminal d'Øygarden, une île à l'ouest de la Norvège. Le gaz liquéfié a ensuite été acheminé par un pipeline jusqu'à 110 km au large, avant d'être injecté à 2600 m de profondeur sous la mer du Nord. Porté et financé par l'État norvégien, mais aussi par des acteurs privés (Equinor, Shell et TotalEnergies), le projet Northern Lights d'enfouissement de CO_2 démarre avec une capacité annuelle de 1,5 million de tonnes. Une quantité bien modeste comparée aux 40 milliards de tonnes émises par les activités humaines chaque année. Néanmoins, c'est une première : jamais encore une infrastructure de stockage n'avait été ouverte à des expéditeurs venus de plusieurs pays européens. Si ce CO_2 stocké provient de deux sites pilotes norvégiens (une cimenterie à Brevik et une usine de déchets à Oslo), des accords commerciaux ont été conclus avec les Pays-Bas, le Danemark, et la Suède. Northern



NORTHERN LIGHTS

La première injection de carbone dans les profondeurs de la mer du Nord a été réalisée cet été par la société Northern Lights, installée à Øygarden, une petite île norvégienne. Elle a déjà signé des accords commerciaux avec plusieurs pays européens.

Lights devrait donc rapidement monter en régime, avec 5 millions de tonnes annuelles en 2028.

À bas bruit, mais à marche forcée, le procédé de captage et de stockage de CO_2 (CCS pour carbon capture and storage) se déploie. Selon le Global CCS Institute, 65 installations de captage et de stockage sont déjà opérationnelles dans le monde, représentant une capacité de 57 millions de tonnes de CO_2 par an. Et plus de 600 projets sont en développement. Un verrou technologique aurait-il sauté pour permettre tout à coup cette floraison de projets ? *« Les procédés de captage ont commencé à se développer aux débuts des années 2010, et ils sont mûrs depuis quelque temps déjà »*, relativise Florent Guillou, expert du captage à l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (Ifpen). Pour lui, le moteur de cet emballement est ailleurs. Si le captage et le stockage de CO_2 accélèrent aujourd'hui, c'est surtout grâce à la mise en place d'une réglementation internationale, notamment européenne. *« Du Green Deal et son objectif de neutralité carbone en 2050 au Net Zero Industrial Act* [adopté le 29 juin 2024, il vise à renforcer la production de technologies propres au sein de l'Union européenne], *cela pose les bases d'un cadre pour que les industriels puissent investir. »*

Les objectifs fixés par ces différents engagements sont de 450 millions de tonnes de CO_2 stockées pour l'Europe, 5 à 6 milliards de tonnes à l'échelle mondiale à l'horizon 2050. *« C'est 12 % des rejets mondiaux actuels,* rappelle Florent Guillou. *On voit donc que le CCS n'est qu'un volet de la décarbonation de l'industrie, et qu'il ne suffira pas. »* De fait, le premier levier pour limiter les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie reste la sobriété énergétique. Pour les besoins incompressibles, le recours aux énergies bas carbone (renouvelable, nucléaire) est nécessaire. Et en bout de chaîne, le captage et le stockage pour les industries dont la production de CO_2 demeure inévitable. *« Mais ce levier-là est le plus cher, les industriels ont donc intérêt à actionner d'abord les autres »*, note l'expert. Plusieurs techniques sont d'ores et déjà disponibles *(lire p. 42)*.

Le captage direct dans l'air, une technique coûteuse

Un procédé se distingue particulièrement : le captage direct dans l'air (DAC). Avec seulement 0,04 % de CO_2, l'atmosphère est une source extrêmement diluée. Or, plus le CO_2 est dilué, plus le capter est coûteux. *« L'atmosphère est 250 fois moins concentrée en CO_2 que les fumées industrielles. On ne va pas dépenser 250 fois*

SAMEER AL-DOUMY / AFP

La cryogénie est utilisée par la société Revcoo pour liquéfier le CO_2 capté dans une cheminée d'usine (ici celle d'Eiffage, dans le Nord).

PROCÉDÉS

Plusieurs techniques de captage disponibles

LA POSTCOMBUSTION, la technique plus répandue, est installée en sortie de cheminée. Les fumées passent dans une colonne de lavage où des solvants chimiques à base d'amines (dérivés de l'ammoniac), fixent le CO_2. Le gaz capté est récupéré par chauffage de la solution aminée, ce qui permet au passage de régénérer le solvant. Elle est facilement adaptable sur les installations existantes, un peu comme un *plug & play*, mais coûteuse en énergie à cause de l'étape de chauffe. Toutefois, des gains d'efficacité sont possibles. L'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (Ifpen) assure ainsi avoir réussi à réduire d'environ 30 % la consommation d'énergie par rapport aux amines de première génération, grâce notamment à un nouveau solvant.

LA PRÉCOMBUSTION *« est pertinente pour les industries qui produisent de l'hydrogène ou de l'ammoniac »*, indique Florian Guillou, expert du captage à l'Ifpen. En effet, pour fabriquer ces gaz, on part d'un hydrocarbure (gaz naturel, charbon ou biomasse) que l'on transforme en gaz de synthèse ($CO + H_2$). Ce mélange est ensuite enrichi en hydrogène. Le monoxyde de carbone réagit avec la vapeur d'eau pour donner du CO_2 et de l'H_2.
Le CO_2 concentré et sous pression peut être séparé — soit par l'utilisation de solvants physiques, soit par adsorption sur solides, ou encore avec des membranes — tandis que l'hydrogène peut être brûlé ou utilisé comme matière première. Là encore, le coût reste élevé du fait de la consommation d'énergie.

L'OXYCOMBUSTION consiste à brûler le combustible non pas à l'air mais à l'oxygène pur, ce qui produit des fumées presque uniquement composées de CO_2 et de vapeur d'eau. Il suffit donc de condenser l'eau pour récupérer du CO_2 pur. C'est intéressant pour les cimenteries, dont un tiers du CO_2 émis provient de la combustion. *« L'idée est séduisante, mais cela nécessite des installations très spécifiques, moins facilement adaptables qu'un procédé de postcombustion »*, souligne l'expert.

LA CRYOGÉNIE constitue une piste intéressante pour condenser les fumées à très basse température. En France, Air Liquide s'est imposé comme pionnier, avec des technologies déjà déployées depuis dix ans à l'échelle industrielle sur son site de Port-Jérôme (Normandie). Mais de nouveaux acteurs cherchent à bousculer le secteur. C'est le cas de la start-up lyonnaise Revcoo par exemple, fondée en 2019, qui développe un démonstrateur industriel de captage cryogénique. Elle mise sur des solutions plus modulaires, conçues pour s'adapter à des sites de taille moyenne. *« La cryogénie est prometteuse, mais elle consomme de l'électricité. Elle doit donc être plutôt réservée à des pays dont le mix énergétique est largement décarboné »*, conclut Florent Guillou. **F. N.**

plus d'énergie pour le piéger, mais tout de même entre trois et cinq fois plus », constate Florent Guillou. Avec des estimations allant jusqu'à 1000 euros le coût d'extraction d'une tonne de CO_2, le captage direct dans l'air peut-il trouver son modèle économique ? *« Il y a une place,* affirme-t-il. *Les premiers clients ont été les géants du numérique, les Gafam* [Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft], *prêts à payer plusieurs centaines de dollars la tonne pour compenser leurs émissions et afficher un bilan net zéro avec le système des crédits carbone.* » Mais à l'autre bout du spectre, les petits émetteurs peuvent aussi y trouver leur compte. *« Pour certains, il est plus cher de capter leur propre CO_2 que d'acheter un crédit carbone issu du DAC ou d'autres sources.* »

Des réservoirs rocheux pouvant accueillir et retenir le CO_2

Deux approches technologiques dominent aujourd'hui. La voie liquide, portée par la société canadienne Carbon Engineering, repose sur une solution alcaline qui fixe le CO_2 de l'air sous forme de carbonates, ensuite décomposés à haute température (environ 900 °C) pour libérer du CO_2 pur. L'autre est la voie solide, développée par la start-up suisse Climeworks : elle utilise des matériaux adsorbants qui captent le CO_2 à la surface, puis le relâchent lors d'un cycle de chauffage à basse température (autour de 100 °C). La première approche est testée à grande échelle avec le projet Stratos, au Texas (États-Unis). La seconde, moins gourmande en énergie, fonctionne en unités modulaires, comme Orca ouverte en 2021 (objectif : 4000 t par an) et Mammoth en 2024 (40 000 t par an), en Islande. *« Climeworks pourrait monter à 400 000 t par an à l'horizon 2030 avec le projet Cypress, si celui-ci n'est pas remis en cause par la nouvelle administration américaine* », indique Florent Guillou.

Mais capter le CO_2 n'est qu'une moitié de l'équation. Pour qu'il serve réellement à réduire les émissions, encore faut-il l'acheminer et l'enfouir de façon sûre et durable. C'est tout l'enjeu de la seconde étape du captage direct dans l'air : le stockage géologique. *« Un bon site d'enfouissement doit répondre à deux critères principaux,* explique Thomas Le Guénan, ingénieur de recherche au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). *D'abord une roche "réservoir", suffisamment poreuse et perméable pour accueillir le gaz et permettre son injection à débit industriel. Ensuite, une roche "couverture", imperméable et continue, qui assure le confinement et empêche toute remontée du CO_2.* »

Ces réservoirs n'ont rien à voir avec de vastes cavités souterraines. Ils ressemblent davantage à des « éponges rocheuses » : des grès ou calcaires sédimentaires dont 15 à 20 % du volume est constitué de pores microscopiques, saturés d'eau salée. *« À l'œil nu, on ne verrait rien, pourtant ces roches peuvent accueillir de grandes quantités de CO_2* », détaille Thomas Le Guénan. Pour garantir la sécurité et optimiser le stockage, on privilégie une injection au-delà de 800 à 1000 m de profondeur, où la pression et la température maintiennent le CO_2 à l'état dit supercritique : un fluide dense, occupant 30 fois moins de volume qu'à la surface. Cette profondeur évite aussi tout conflit avec les nappes d'eau potable. Ces caractéristiques se retrouvent dans deux grands types de réservoirs. Les gisements épuisés de pétrole ou de gaz présentent un avantage évident : ils ont déjà prouvé leur capacité à retenir des fluides pendant des millions d'années, et les données accumulées par l'industrie pétrolière offrent une connaissance fine de leur géologie. Viennent ensuite les aquifères salins profonds, des formations rocheuses saturées en eau saumâtre, abondantes dans les bassins sédimentaires. Leur potentiel de stockage est

PROJET

En Islande, injecter le CO_2 dans du basalte

Stocker chaque année 3 millions de tonnes de carbone dans le basalte islandais : telle est l'ambition du projet Coda Terminal mené par la société Carbfix à Straumsvík, au sud-ouest de la terre des geysers. Le CO_2 est capté soit localement en sortie d'usines, de fonderies, etc., soit ailleurs en Europe et transporté sous forme liquide par navire vers l'Islande. Le procédé consiste à dissoudre le CO_2 dans de l'eau, puis à injecter le mélange en profondeur dans un basalte perméable, jeune et réactif, qui libère rapidement les composés (calcium, magnésium, fer…) nécessaires à la minéralisation du CO_2 en carbonates stables en moins de deux ans. Le dispositif, dont la construction débute cette année, devrait atteindre sa pleine puissance après 2030. L'abondance de sources d'énergie géothermique en Islande doit permettre de réaliser ces opérations avec une empreinte carbone faible. S. R.

MARKO DJURICA / REUTERS

Le gaz acheminé par les tuyaux est mélangé à de l'eau avant d'être injecté dans la roche (ici une installation de Carbfix à Ölfus, en Islande).

ÉTUDE

Quelle limite pour le stockage géologique du CO_2 ?

Une étude parue dans *Nature* en septembre dernier fixe une limite planétaire *« prudente »* au stockage géologique du carbone : environ 1460 milliards de tonnes de CO_2, soit bien moins que les estimations retenues jusque-là, qui vont de 10 000 à 40 000 milliards de tonnes. L'étude conclut que l'enfouissement du carbone n'offrirait qu'une marge de manœuvre limitée pour inverser le réchauffement, au mieux 0,7 °C.
« La démarche des auteurs met utilement en lumière que le sous-sol n'est pas infini. Mais ils retiennent des hypothèses très restrictives qui réduisent fortement le potentiel », nuance Thomas Le Guénan (BRGM). Par exemple, l'étude écarte d'emblée les sites situés à plus de 2500 m de profondeur. Or, le projet norvégien Northern Lights, qui a commencé à injecter du CO_2 à 2600 m sous la mer du Nord, démontre que de tels stockages sont techniquement et géologiquement viables. De son côté, l'ingénieur de recherche a participé à l'étude Evastoco$_2$, commandée par la Direction générale de l'énergie et du climat et rendue en février dernier, qui a estimé les capacités de stockage de la France hexagonale à 4,8 milliards de tonnes (en comptant les eaux territoriales), avec donc des critères différents. *« Nous avons déterminé un potentiel physique qui repose sur la quantité de réservoirs, la résistance des roches à la pression d'injection, etc. L'étude parue dans* Nature *prend davantage en compte les aspects socio-économiques, d'acceptation du public notamment, qui existent aussi mais qui sont plus subjectifs. »* **F. N.**

immense, mais ils demandent plus de caractérisation, car ces structures sont moins bien connues que les réservoirs exploités pour les hydrocarbures.
Il reste à assurer la pérennité du stockage. Le risque de fuite est maximal pendant la phase d'injection, quand la pression est la plus élevée. Ensuite, les mécanismes comme la dissolution ou la minéralisation du CO_2 renforcent la sécurité à long terme *(lire l'encadré ci-dessus)*. *« On ne se contente pas d'injecter et de refermer le puits,* précise Thomas Le Guénan. *On met en place tout un dispositif de suivi, avec des capteurs de pression et de sismicité, des contrôles géochimiques et parfois même des observations sismiques en 3D, afin de vérifier que le CO_2 reste bien confiné. »*
Mais au-delà des considérations techniques, l'économie demeure le nerf de la guerre pour pérenniser le captage et le stockage du CO_2. *« Pour un industriel, la question n'est pas seulement de savoir si la technologie est disponible, mais si elle coûte moins cher que de continuer à émettre et à payer »*, résume Paula Coussy, experte de l'économie carbone à l'Ifpen. Depuis 2005, le système européen d'échange de quotas d'émission, le « marché carbone », fixe un plafond d'émissions par périodes appelées phases. Actuellement, le système est dans sa phase 4, allant de 2021 à 2030. Dans ce cadre, les industriels concernés (énergie, sidérurgie, ciment, chimie…) reçoivent ou achètent des droits d'émettre du CO_2. En septembre 2025, ces quotas s'achetaient autour de 78 euros la tonne.

BRGM

« On met en place tout un dispositif de suivi afin de vérifier que le CO_2 reste bien confiné »

Thomas Le Guénan, ingénieur de recherche au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Le coût des opérations, une donnée majeure

Dès lors, l'équation semble simple : l'entrepreneur doit comparer le coût du captage et du stockage de CO_2 au prix des droits à émettre qu'il devra payer sur plusieurs années. Là où cela se complique, c'est que chaque projet repose sur un modèle économique spécifique, dépendant de la filière, des volumes à capter, de la proximité d'un site de stockage et de la possibilité de mutualiser les infrastructures avec d'autres industriels… Sachant que les investissements et les coûts opératoires sont lourds et s'échelonnent au moins sur une vingtaine d'années, les acteurs économiques sont un peu dans le brouillard car ils ignorent combien vaudra la tonne de CO_2 dans 20 ans. Seule certitude : *« Aujourd'hui, la chaîne CCS reste plus chère que le coût d'achat des droits d'émettre,* note Paula Coussy. *Et cela, même si le prix de la tonne doit atteindre les 200 euros d'ici à 10-15 ans. »*
Si le captage et le stockage de CO_2 ne peuvent pas tout, ils demeurent la seule façon de traiter les émissions inévitables pour des années encore. Reste à voir si les sociétés seront prêtes à investir suffisamment, et surtout au rythme imposé par les changements du climat, pour accompagner les acteurs industriels. ■ **F. N.**

Parmi les solutions étudiées par les chercheurs, la culture des macroalgues pour les transformer en nourriture, en biocarburants ou faire sédimenter le carbone.

HENLEY SPIERS/NATUREPL/EBPHOTO

DANS L'EAU

Les promesses de la pompe océanique

Accélérer la séquestration de CO_2 en cultivant des macroalgues, en renforçant l'alcalinisation des eaux ou en restaurant les mangroves… Autant de projets qui visent à stimuler la machinerie océanique, plus gros réservoir de carbone au monde.

L'océan, qui occupe plus de 70 % de la surface de notre planète, constitue aussi son plus gros réservoir de carbone, qu'il stocke 50 fois plus efficacement que l'atmosphère. Depuis 1850 et les débuts de la révolution industrielle, il a ainsi absorbé près de 25 % du carbone anthropique (soit 679 milliards de tonnes de CO_2), sans mobiliser terres arables, eau douce ou engrais. Si ce rôle dans le cycle du carbone a entraîné son acidification excessive — ce qui a conduit au dépassement récent de la septième limite planétaire —, cet espace offre encore un *« potentiel considérable pour le développement de méthodes d'élimination du CO_2 »*, note l'Académie des sciences. Ce puits naturel fonctionne grâce à deux processus, physique et biologique. La pompe physique découle de la différence de pression existant entre le CO_2 atmosphérique et le marin, qui permet de dissoudre l'excès de CO_2 atmosphérique à la surface de l'océan. Celui-ci se transforme ensuite en acide carbonique, bicarbonates et carbonates. Cette dissolution, plus efficace à basse température, fait de l'Atlantique Nord et de l'océan Austral deux acteurs essentiels dans la machine climatique : leurs eaux froides et denses plongent en emportant vers le fond le CO_2 qui y reste séquestré pendant des siècles.

La pompe biologique s'appuie, quant à elle, sur la photosynthèse réalisée par le phytoplancton, des algues microsco-

piques qui captent le carbone de surface et le transforment en matière organique. Une partie de cette matière est exportée vers les profondeurs sous forme de cellules mortes, d'excréments et autres agrégats. Si la majeure partie de cette neige organique est dégradée par les bactéries avant d'atteindre le plancher océanique, une petite fraction atteint les abysses et y demeure stockée dans les sédiments. Ces mécanismes ont pour conséquence des couches de surface globalement déficitaires en CO_2 par rapport aux profondeurs, ce qui favorise le transfert de CO_2 depuis l'atmosphère vers l'océan.

CAPTURA CORP

La start-up Captura projette de déployer sur les côtes ses systèmes de captage du CO_2 dans l'eau de mer (vue d'artiste).

L'apport de fer stimulerait la photosynthèse dans l'océan

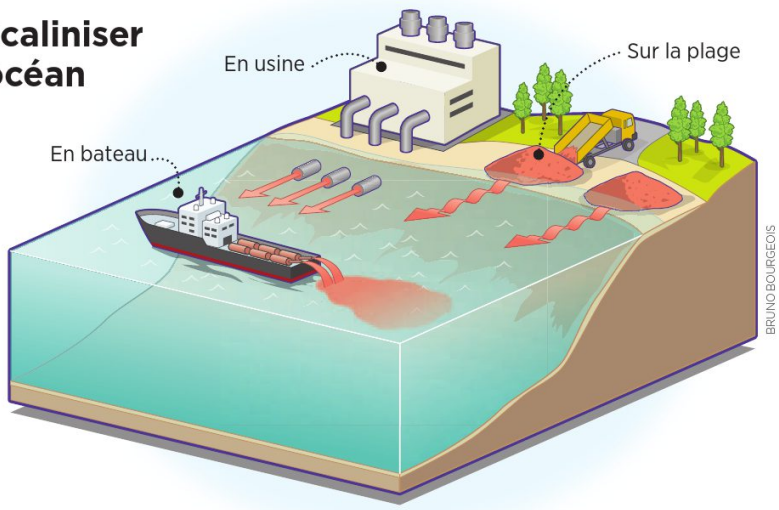
Aujourd'hui, une cinquantaine de projets soutenus par des communautés scientifiques associées au secteur privé, principalement aux États-Unis et en Chine, cherchent à augmenter l'efficacité de ces deux processus. La fertilisation par le fer — essentiel au développement des micro-organismes marins — revient ainsi en force. *« Donnez-moi une demi-citerne de fer, et je vous donnerai une période glaciaire »* : cette formule est de John Martin, l'océanographe américain qui a émis, au début des années 1990, l'hypothèse selon laquelle l'apport de ce minerai stimulerait la photosynthèse dans les zones océaniques qui en manquent. Si l'expérimentation à grande échelle a montré que c'est bien le cas, l'efficacité du transfert de carbone vers les profondeurs reste variable et incertaine.

Lorsque des acteurs privés ont proposé d'utiliser la fertilisation en fer en échange de crédits carbone, la convention de Londres de 2008 a restreint la méthode aux seules expériences scientifiques contrôlées. Car les études ont mis en évidence que cette pratique favorise la prolifération de certains types de microalgues au détriment d'autres, entraînant des déséquilibres trophiques et la production de gaz à effet de serre secondaires.

Remonter de l'eau riche en nutriments vers la surface

L'*upwelling* et le *downwelling* artificiels, soit le renforcement des échanges ascendants et descendants, est une autre approche de fertilisation de l'océan inspirée du phénomène de remontées verticales, observé sur les côtes très poissonneuses du Pérou ou de la Namibie. Reproduire ce phénomène artificiellement permettrait théoriquement de stimuler la productivité ailleurs. Dans les années 1990, des ingénieurs ont conçu des systèmes de tubes ou de pompes utilisant l'énergie des vagues pour remonter de l'eau froide et riche en nutriments vers la surface. En 2008, des chercheurs de l'université d'Hawaii (États-Unis) ont testé la méthode au nord d'Oahu sans obtenir de réponse biochimique claire, notamment en matière de production de chlorophylle.

Alcaliniser l'océan



BRUNO BOURGEOIS

Ces trois techniques permettent de répandre des minéraux alcalins (en rouge) dans l'océan afin de compenser son acidité et restaurer sa capacité à absorber du CO_2.

TECHNIQUES

L'extraction directe du carbone, une solution locale

Plus technique, l'extraction directe du CO_2 dissous dans l'eau de mer peut se faire selon différents procédés. Pour son troisième pilote démarré en début d'année à Hawaii (États-Unis), la start-up américaine Captura a mis en place un système d'électrodialyse : sous l'effet d'une tension électrique, des membranes dissocient l'eau de mer captée en surface en un flux acidifié et un flux alcalin. Dans le premier, l'eau plus acide convertit une partie des carbonates en CO_2 dissous libre, plus facile à extraire. L'eau de mer ainsi « décarbonée » et un peu plus alcaline est rejetée dans l'océan. Captura espère ainsi retirer des eaux hawaiiennes 1000 tonnes de CO_2 par an. À plus longue échéance, l'entreprise envisage de s'appuyer sur des infrastructures existantes — stations de dessalement ou plateformes pétrolières — pour augmenter son efficacité. Le CO_2 étant jusqu'à 150 fois plus concentré dans l'océan que dans l'air, ce procédé semble plus rapide et potentiellement moins coûteux que la capture d'air direct. La société américaine Equatic teste de son côté l'électrolyse de l'eau de mer : elle permet de former des minéraux carbonatés qui emprisonnent durablement le CO_2 sous forme solide. La société, qui dispose de petits pilotes à Singapour et Los Angeles (États-Unis), annonce coproduire de l'hydrogène utilisable comme carburant vert. **S. R.**

Autre stratégie de séquestration de CO_2 par photosynthèse : la culture de macroalgues, comme le kelp, les laminaires ou les sargasses, qui ont l'avantage de pousser vite — jusqu'à 30 à 60 cm par jour. Cette biomasse peut être récoltée pour en faire des biocarburants, des aliments, des engrais, ou encore coulée vers les profondeurs pour faire sédimenter le carbone. Une production massive pourrait, en théorie, séquestrer plusieurs milliards de tonnes de CO_2 par an. Plusieurs projets pilotes sont aujourd'hui en cours, dont le projet Ocean Rainforest, au large des îles Féroé, soutenu par l'Union européenne.

« Ces techniques, par définition, modifient très fortement l'écosystème océanique, notamment en apportant plus de matières organiques en profondeur, remarque Laurent Bopp, climatologue et océanographe, membre de l'Académie des sciences. *En fertilisant l'écosystème de surface, celui-ci consomme des éléments nutritifs tels l'azote et le phosphore qui vont être soustraits de l'océan de surface et envoyés au fond avec la matière organique, ce qui a des répercussions sur les cycles des nutriments marins.* » Dans une publication récente, Laurent Bopp et des scientifiques anglais ont ainsi montré que si on fertilisait l'océan à grande échelle, on augmenterait certes la production du phytoplancton dans les zones limitées par le fer, mais cela affecterait la pompe biologique naturelle dans d'autres régions, parfois distantes de plusieurs milliers de kilomètres, avec des effets sur toute la chaîne alimentaire jusqu'aux poissons !

VALERIE LILETTE

« Si on enrichissait en fer l'océan Austral, les eaux très poissonneuses du Chili et du Pérou connaîtraient d'importantes baisses de biomasse »

Laurent Bopp, climatologue et océanographe, chercheur au Laboratoire de météorologie dynamique

« Ainsi, si on "fertilisait" l'océan Austral, plus vaste zone océanique limitée en fer, les eaux très poissonneuses du Chili et du Pérou connaîtraient d'importantes baisses de biomasse », souligne Laurent Bopp. *Idem* pour la culture à grande échelle de macroalgues en zone côtière, qui soustrait des éléments nutritifs de l'océan de surface au détriment de la production phytoplanctonique.

Des risques de perte d'oxygène dans les profondeurs

De plus, en coulant vers les profondeurs, cette biomasse alimente bactéries et zooplancton. Ce faisant, ils consomment de l'oxygène et émettent du CO_2. *« Une partie du carbone organique fixé en surface est ainsi recyclée dans la colonne d'eau,* note Jean-Pierre Gattuso, océanologue au Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer. *Et, du fait de la consommation d'oxygène par les organismes qui décomposent la matière organique, des zones situées autour de 400 à 600 mètres de profondeur risquent de devenir suboxiques, c'est-à-dire avec peu d'oxygène, ou anoxique, sans oxygène. Avec des conséquences sur les populations de poissons qui ont absolument*

besoin d'oxygène pour survivre. » En outre, quand l'oxygène se fait rare, les micro-organismes passent à d'autres processus de respiration qui augmentent la production d'autres gaz à effet de serre, tels le protoxyde d'azote, le méthane ou le sulfure d'hydrogène. *« Nous avons aujourd'hui suffisamment d'informations pour ne pas continuer à promouvoir ces méthodes fondées sur la biologie »*, conclut Laurent Bopp.

Garantir la fiabilité des méthodes est indispensable

Celles inspirées de la géochimie naturelle semblent *a priori* plus prometteuses. Il s'agit dans ce cas d'accélérer le processus géologique d'altération des silicates et des carbonates continentaux, qui draine en mer des minéraux alcalins. Ceux-ci compensent en partie l'acidification de l'océan. L'altération naturelle des roches consomme environ un milliard de tonnes de CO_2 chaque année, qui sont convertis en carbonates ou bicarbonates, soit des composés stables ensuite stockés pendant des siècles. Pour reproduire à plus court terme ce processus, des scientifiques proposent d'épandre de l'olivine, de la soude, du carbonate de calcium issus de broyats de coquilles d'huîtres. Ou encore de l'hydroxyde de magnésium provenant de résidus miniers ou industriels. Depuis fin 2024, ce composé minéral est ajouté en continu à l'eau de refroidissement sortant de la centrale électrique du port d'Halifax (Canada) par la société Planetary Technologies. *« L'alcalinisation pourrait permettre de capturer 3 à 30 milliards de tonnes de CO_2 par an, ce qui pourrait compenser nos émissions ! »*, estime Fabrice Pernet, chercheur à l'Ifremer de Plouzané. Et les silicates et carbonates sont très abondants dans le manteau terrestre. Mais l'augmentation de l'alcalinité modifie la chimie de l'océan. Et les roches terrestres contiennent des métaux tels le nickel, le cobalt, le zinc ou le chrome qui ont une panoplie d'effets sur la chimie marine. L'olivine a par exemple un effet très négatif sur les larves d'huîtres.

NORBERT WU / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

Les mangroves sont des puits de carbone plus efficaces que les forêts tropicales.

L'efficacité de ces méthodes doit aussi pouvoir être mesurée. *« L'objectif est de distribuer des crédits carbone,* explique Jean-Pierre Gattuso. *Or, pour éviter les scandales déjà observés sur terre, il est indispensable de garantir la fiabilité du système. Il faut prouver que le CO_2 a bien été stocké pour au minimum 100 ans. »* En effet, si les grains d'olivine ou de calcaire chutent directement au fond de l'océan, la masse d'eau alcalinisée ne sera pas en contact avec l'atmosphère et aucune fixation réelle de CO_2 n'aura lieu. D'où le choix fait par l'ONG américaine Vesta d'épandre de l'olivine broyée sur une plage d'une île des Caraïbes. En amont de la troisième conférence des Nations unies pour l'océan qui s'est tenue en juin à Nice, plusieurs chercheurs ont pointé le coût de ces méthodes. *« L'extraction des minéraux est très coûteuse, tout autant que leur transport, leur broyage et leur acheminement en mer,* note Fabrice Pernet. *L'ensemble de ces opérations génère également des émissions de CO_2, qui viennent partiellement compenser celui que l'on espère fixer dans l'atmosphère ! »*

Des restaurations réussies d'écosystèmes marins

À Nice, les chercheurs ont rappelé le rôle important des écosystèmes marins et côtiers, notamment des mangroves qui stockent le carbone atmosphérique à un rythme de quatre à dix fois supérieur à celui des forêts tropicales. Si, depuis les années 1980 environ, 20 à 35 % des mangroves mondiales ont disparu au profit d'élevages de crevettes et autres infrastructures touristiques, des restaurations réussies se multiplient : dans la baie de Jiquilisco, au Salvador, plus de 70 hectares de mangroves ont ainsi été restaurés par la communauté locale. Parmi les autres initiatives prometteuses : la restauration des zones humides en régions côtières, des herbiers marins, des marais salants ou encore l'instauration de récifs d'huîtres, qui stabilisent les sédiments riches en carbone et favorisent leur enfouissement. *« Préserver et restaurer ces écosystèmes permettrait de les laisser continuer à faire leur travail naturel de stockage du carbone »*, conclut Jean-Pierre Gattuso. ■ **S. R.**

TEMPÉRATURE OCÉANIQUE

Les dangers des canicules marines

Début juillet, une bouée a enregistré une température océanique de surface de près de 31 °C au large de l'archipel des Baléares (Espagne), tandis que la Côte d'Azur affichait des anomalies de +5 °C par rapport à la normale. En Atlantique Nord, l'été 2023 a connu une température record de surface de mer de 25 °C. Les canicules marines, et plus généralement le réchauffement des eaux de surface, réduisent l'efficacité des deux « pompes » océaniques. Plus chaudes, les eaux dissolvent moins de CO_2. Moins denses, elles contribuent à la stratification de l'océan, qui réduit le brassage entre surface et profondeur, et donc le transport du CO_2 vers les abysses. Cela limite aussi l'apport d'azote et de phosphore des couches profondes vers la surface, ce qui affecte la productivité phytoplanctonique. Le rôle de l'océan comme puits de carbone en est affecté et cela crée une boucle positive en faveur du réchauffement global. S. R.

SUR TERRE

Restaurer les puits de carbone naturels

Durant la COP30 au Brésil, chaque pays devra détailler sa politique de développement des puits de carbone terrestres. Les outils existent : reforestation, agriculture raisonnée, substitution des énergies fossiles par la biomasse.

JANE HAHN/REDUX-REA

Le projet de grande muraille verte en Afrique, commencé en 2007, a pour objectif de planter des arbres résistant à la sécheresse sur 7700 kilomètres à la lisière du désert du Sahara (ici au Sénégal).

Un symbole. La trentième rencontre des parties (COP30) signataires de la convention onusienne de lutte contre le changement climatique se déroulera du 10 au 21 novembre dans la ville brésilienne de Belém, aux portes de l'Amazonie. Après deux sessions dans des États pétroliers où l'on a beaucoup parlé d'énergie, la gestion des puits de carbone terrestre et océanique revient en tête des préoccupations des États. Les végétaux pompent du CO_2 dans l'air pour leur photosynthèse. La destruction de cette biomasse, qui représente 83 % des 550 milliards de tonnes d'organismes vivants à la surface de la planète, fait donc augmenter la teneur en CO_2. Quand les végétaux se développent mieux et plus, c'est au contraire un retrait plus efficace du principal gaz à effet de serre de l'atmosphère qu'on obtient. L'humain a en main un outil de pilotage du climat, qui reste cependant difficile à manier.

Réuni sous le chapitre à la dénomination austère d'« utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (Utcatf) dans les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), le puits terrestre du CO_2 est soumis à des pressions divergentes, des usages contradictoires. L'utilisation des terres, c'est le partage de la surface des conti-

FINANCEMENT

Quel crédit donner au crédit carbone ?

L'article 6 de l'accord de Paris devrait beaucoup faire parler de lui à Belém lors de la COP30. Il s'agit en effet d'instaurer un marché mondial du carbone. Le financement de la sauvegarde de forêts et zones naturelles génère des crédits carbone que les entreprises peuvent négocier sur un marché spécifique, ou bien proposer comme « effacement » du CO_2 émis, ainsi que le proposent les compagnies aériennes à leurs clients. Une étude parue dans *Science* en août 2023 a démontré que les promesses de captage de CO_2 sur les zones protégées sont bien inférieures à la réalité et ne correspondent pas au service climatique promis. *« Ces crédits sont en effet émis à partir de la différence entre deux scénarios, l'un avec protection, l'autre sans,* explique Philippe Delacote, chercheur à l'université de Lorraine. *C'est un pari sur l'évolution future d'une zone, donc la méthode est très hasardeuse. »*

Selon une étude, les promesses de captage de CO_2 sur les zones protégées ne correspondent pas au service climatique promis

Une étude publiée dans *Nature Sustainability* en juillet dernier propose une autre méthode, plus vertueuse, qui procède par comparaison par image satellite entre une zone sous crédit carbone et une zone référence non protégée. *« On peut ainsi évaluer dans le temps la croissance des arbres et donc comptabiliser précisément le CO_2 stocké »*, poursuit Philippe Delacote. Problème : l'entreprise qui finance l'opération ne peut savoir à l'avance de combien de crédits elle va pouvoir disposer. Elle devra attendre que les arbres poussent. *« C'est tout le débat qui aura lieu à Belém,* estime le chercheur. *Veut-on un marché du crédit carbone large mais peu vérifiable ou bien un marché plus resserré mais sérieux ? »*

La délégation française arrivera ainsi au Brésil avec une polémique dans ses bagages.

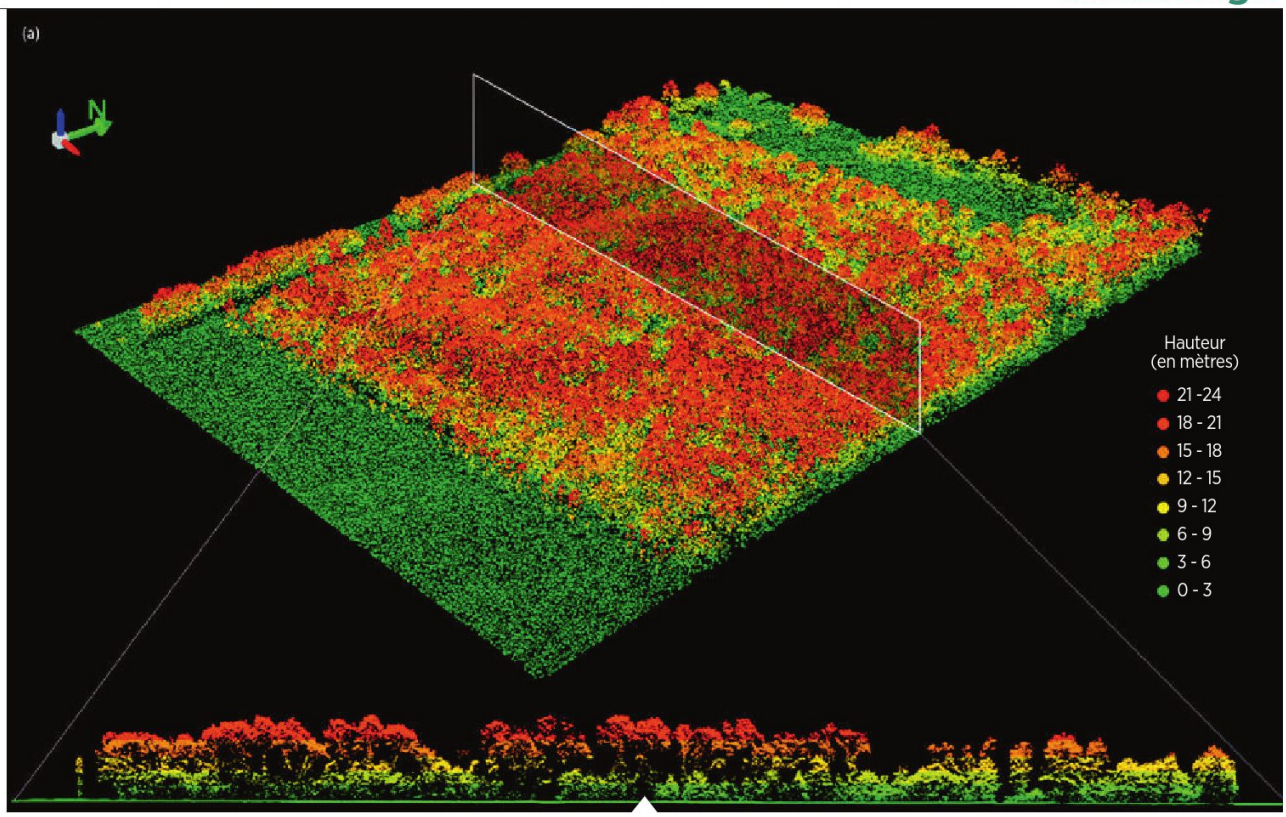
La recherche académique française estime qu'un hectare de terre abandonnée qui s'enfriche naturellement stocke sous nos latitudes entre 4 et 5 tonnes de CO_2 par hectare et par an. Mais dans son calcul de crédit carbone d'un projet de reboisement sur ces friches, le ministère de l'Agriculture a choisi une valeur deux fois inférieure, accordant ainsi à l'humain ce que la nature aurait de toute façon réalisé. Et créant ainsi des tonnes de carbone fictives ! **L. C.**

nents entre zones naturelles (savanes, landes, tourbières…), terres agricoles et forêts. Le changement d'affectation recouvre toutes les modifications entre ces trois compartiments : déforestations d'un côté, retour à un état naturel et reforestation de l'autre.

Les végétaux stockent plus de CO_2 qu'ils n'en émettent

D'un côté, les mauvaises pratiques agricoles (comme l'arasement des haies, l'augmentation des surfaces des parcelles, les excès d'engrais et de pesticides), le défrichage de terres naturelles, la déforestation et les effets des incendies et tempêtes sont responsables d'environ 20 % des émissions mondiales de CO_2. De l'autre, les écosystèmes préservés et les opérations de reforestation et de réhabilitation de zones autrefois exploitées ont permis d'absorber un tiers des émissions globales de gaz à effet de serre d'origine humaine. Entre 2014 et 2023, les végétaux ont stocké en moyenne chaque année 4,1 milliards de tonnes de CO_2 de plus qu'ils n'en ont émis, selon le Global Carbon Project. Cette équipe internationale délivre même une bonne nouvelle : les émissions annuelles attribuables à une déforestation irréversible ont considérablement diminué lors de cette décennie, même si le niveau reste élevé, à 3,7 milliards de tonnes par an. On commence ainsi à mesurer l'effet des opérations de reforestation (on replante de la forêt sur de la forêt) ou d'afforestation (on replante sur des terres qui n'étaient pas occupées par des arbres auparavant). 2 milliards de tonnes de CO_2 par an sont retirées de l'atmosphère par des interventions humaines. Ces dix dernières années, les émissions dues aux destructions de forêts pour mise en culture passagère (comme la culture sur brûlis), estimées à 2,6 milliards de tonnes par an, ont été compensées par l'abandon de zones agricoles reconquises par la végétation naturellement ou avec l'action humaine.

Ces chiffres globaux cachent des réalités contrastées, que mesure de plus en plus



LIDAR, V. GIANNICO ET AL.

Les outils technologiques permettent de suivre l'évolution du couvert végétal, en mesurant entre autres la hauteur des arbres, comme ici les données lidar d'une zone boisée du parc de Milan Nord (Italie), vingt-neuf ans après sa création.

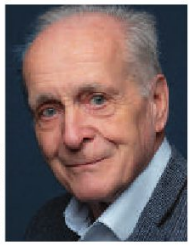
finement l'imagerie satellitaire. Outre le ralentissement de la déforestation et les efforts de reforestation (avec notamment les deux grands projets de « muraille verte » en Chine et en Afrique subsaharienne), les satellites révèlent une vigueur nouvelle de la végétation dans les zones tempérées et boréales grâce à un effet rétroactif du changement climatique. En Sibérie, au Canada, mais aussi en Afrique du Sud, la végétation pousse mieux avec la hausse des températures et les teneurs plus élevées de CO_2 dans l'atmosphère, qui favorisent la photosynthèse.

Mais on note également des effets inverses comme les méga-incendies, de plus en plus récurrents au Canada et en Russie, provoqués à la fois par des températures plus élevées et des végétaux secs facilement inflammables. Et c'est aussi le cas en Europe de l'Ouest en général, où les incendies ravagent des milliers d'hectares, du Portugal à la Grèce et jusqu'en Suède. À l'échelle mondiale, en 2023, 15 % des émissions de gaz à effet de serre provenaient de ces mégafeux souvent incontrôlables, soit 8,6 milliards de tonnes de CO_2. Ces effets positifs et négatifs montrent que nous avons bien à notre disposition un outil puissant de limitation des gaz à effet de serre. *« Le secteur agricole et forestier peut offrir un potentiel d'atténuation du changement climatique à un coût relativement bas. Il peut fournir 20 à 30 % des réductions d'émissions supplémentaires dans les scénarios à 2050 qui limitent la hausse des températures à 2 °C »*, écrivent les auteurs du Giec. Les techniques qui favorisent les puits de carbone sont bien identifiées : agroforesterie (culture conjointe de plantes et d'arbres), réduction forte des engrais chimiques et des pesticides, très émetteurs de gaz à effet de serre, restauration des zones humides et des tourbières, dont les capacités de stockage du CO_2 sont supérieures à celles des arbres. *« La protection, l'amélioration de la gestion, la restauration des forêts, des tourbières, des mangroves, des savanes et des prairies peuvent réduire d'au moins 7,3 milliards de tonnes par an les gaz à effet de serre. L'agriculture*

Les techniques qui favorisent les puits de carbone sont bien identifiées : agroforesterie, réduction forte des engrais chimiques et des pesticides, restauration des zones humides et des tourbières

est le second poste avec 4,1 milliards de tonnes séquestrées par la gestion du carbone du sol des champs et prairies, l'agroforesterie, l'utilisation du biochar [combustion en anaérobie de déchets verts], *l'amélioration de la culture du riz et une meilleure gestion de l'alimentation animale* », estime le Giec. Soit plus du tiers des émissions annuelles anthropiques.

Mais les végétaux ont encore une autre fonction climatique. Ce sont les seuls substituts actuellement disponibles aux pétrole, gaz et charbon en matière de production de chaleur et de carburant, en attendant un déploiement massif des énergies renouvelables, qui commence à s'accélérer. En effet, le bilan de la biomasse est considéré comme neutre. Le végétal brûlé émet du CO_2 qui est immédiatement absorbé par les autres plantes. Le bois est la seule énergie à la disposition de près d'un milliard de personnes vivant principalement dans les zones tropicales pour la cuisson des aliments, la production d'eau chaude et le chauffage. Et dans les pays développés, c'est une ressource convoitée pour réduire l'usage du gaz naturel et du fioul pour la période de chauffe hivernale. *« Il faut donc trouver un équilibre entre les fonctions de puits naturel du CO_2 et les usages en énergie, biocarburant, biochimie »*, pose Dominique Vignon, membre de l'Académie des technologies et coauteur d'un rapport paru en mai sur les apports en France dans la transition énergétique.


STUDIOCABRELLI

« Il faut trouver un équilibre entre les fonctions de puits naturel du CO_2 et les usages en énergie, biocarburant, biochimie »

Dominique Vignon,
membre de l'Académie des technologies

À Belém, les 195 États devront avoir déposé au secrétariat de la convention de l'ONU sur le climat leurs engagements de réduction des gaz à effet de serre pour 2035 et 2050. Aux côtés du développement des énergies renouvelables, des actions de sobriété, des politiques d'adaptation au changement climatique, figureront les puits de carbone terrestres. *« En 2050, les émissions résiduelles de CO_2 dues à l'impossibilité de ne plus utiliser le pétrole et le gaz pour certains usages comme la sidérurgie ou le transport aérien, devront être absorbées par la végétation afin d'atteindre le "zéro émission nette", désormais l'objectif d'une majorité de pays »*, rappelle Philippe Delacote, chercheur de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) à l'université de Lorraine et à AgroParisTech. Pour ce faire, chaque pays doit évaluer la capacité de son couvert végétal à absorber du CO_2 et décrire les politiques qui vont permettre de l'améliorer, tout en en réservant une part pour la substitution des énergies fossiles par la biomasse. Ainsi, la France doit passer de 369 millions de tonnes émises en 2024 à 80 millions de tonnes en 2050. Pour atteindre le « zéro émission nette », le puits terrestre devra en effacer autant.

La capacité d'absorption de la forêt française s'est effondrée

Cet exercice, la France le remplit depuis une dizaine d'années avec l'élaboration de la première « stratégie nationale bas carbone » (SNBC). *« Outre les productions des énergies nucléaires et renouvelables, la stratégie nationale bas carbone donne une feuille de route pour la production de chaleur et de biocarburants en évaluant en regard l'évolution de la biomasse terrestre »*, rappelle Félix Boilève, coordinateur du rapport conjoint des Académies des technologies et de l'agriculture. Le potentiel estimé de la biomasse est à l'origine très élevé. Dans la deuxième SNBC adoptée en 2021, la biomasse devait fournir en 2050 430 térawattheures (TWh) d'énergie directement utilisable comme combustible ou après conversion en biogaz et en biocarburant, pour une consommation d'énergie totale de 1150 TWh. Plus de 40 %, donc, de l'effort de reconversion énergétique, et un sacré coup de collier car la biomasse fournit aujourd'hui 150 TWh, pour une consommation totale de 1650 TWh.

Mais les travaux de la troisième SNBC, en cours de publication par décret, ont ramené l'objectif à 305 TWh. Pourquoi ? Des nouvelles alarmantes sont arrivées de la forêt française. Sa capacité d'absorption du CO_2 s'est effondrée. Selon les constats

APPROVISIONNEMENT

La mutation des raffineries vers les biocarburants

Comment assurer la pérennité de l'approvisionnement d'une raffinerie de biocarburants ? TotalÉnergies engage quatre de ses raffineries dans la production de biokérosène, sortant ainsi ces sites du tout-pétrole. Pour cela, le raffineur a signé un contrat avec Avril, leader agro-industriel de la filière des huiles végétales, pour développer les cultures intermédiaires (Cive) chez ses agriculteurs afin de pérenniser les apports. Par ailleurs, un autre contrat avec la principale entreprise de collecte d'huiles de cuisson chez les restaurateurs a été signé pour fournir 60 000 tonnes par an de ce produit. TotalÉnergies vise la production de 500 000 tonnes de biokérosène dès 2028 pour satisfaire aux exigences des règlements européens d'incorporation de 6 % de carburant durable dans l'aérien en 2030. L. C.

SEBASTIEN CHAMPION / NATURIMAGES

Les cultures intermédiaires à valeur énergétique (Cive), plantées entre deux récoltes alimentaires, ont plusieurs atouts. Elles permettent de séquestrer du carbone, d'enrichir les sols et d'être utilisées comme biomasse.

de l'Institut géographique national (IGN), les 11,3 milliards d'arbres présents sur les 17,3 millions d'hectares de forêts ont capté en moyenne 39 millions de tonnes par an entre 2014 et 2022. C'est deux fois moins que dans la première décennie du siècle. *« Bien que la forêt reste un puits de carbone à l'échelle nationale, la production biologique a diminué de 4 % par rapport à la période 2005-2013, la mortalité des arbres a crû de 80 % et la récolte a augmenté de 9 %, essentiellement du fait de la récolte accélérée d'arbres dépérissant ou morts. Ces mortalités non prévues abaissent brutalement des stocks de bois sur pied qui ont mis des décennies à se constituer »*, explique-t-on à l'IGN. Le phénomène est général au sein de l'Union européenne qui ne pourrait mobiliser que 3000 à 3600 TWh en 2050, contre 4700 TWh espérés. Les maladies causées par des insectes (comme les scolytes) et les sécheresses récurrentes expliquent cette « tempête silencieuse », comme la nomment les forestiers.

Le rapport des deux académies estime donc que le potentiel réel mobilisable en France n'est que de 250 TWh par an en 2050, 100 TWh pour la forêt qui, au mieux, devrait rester stable, et 150 TWh pour l'agriculture qui, elle, a un potentiel de croissance de 30 TWh par an. Le secteur dispose en effet d'un levier : les « cultures intermédiaires à valeur énergétique » (Cive). Entre deux récoltes, les terres peuvent accueillir des plantes qui nécessitent peu d'eau et d'intrants pour pousser, comme le miscanthus, l'avoine, la moutarde. Il va donc falloir faire des choix. Aujourd'hui, on tire déjà de la forêt 19,6 millions de m^3 de bois d'œuvre (meubles, charpente, etc.), 10,5 millions de bois d'industrie (pâte à papier, piquets, etc.), et 18 millions de m^3 de bois énergie à 90 % brûlé en bûches chez les particuliers. *« Nous avons donc défini des priorités,* révèle Félix Boilève. *Le biogaz en remplacement du gaz naturel est par exemple essentiel. Le biocarburant pour le transport aérien est à développer modérément. En revanche, l'usage du bois de chauffage doit être limité et la production d'électricité à partir de biomasse doit être arrêtée. »* Ainsi, l'Académie des technologies estime qu'en prélevant environ 10 % de la biomasse française, 1,8 million de tonnes de biokérosène pourrait être produites, ce qui répondrait aux exigences de décarbonation du transport aérien de l'Union européenne de 6 % en 2030.

À Belém, chacun des pays va ainsi arriver à la table des négociations avec ses contraintes de protection et d'exploitation de ses forêts et de ses cultures. Si la biomasse végétale peut constituer une réelle béquille dans la lutte contre le changement climatique, elle n'est pas la solution unique. Les peuples premiers de l'Amazonie seront là pour rappeler que la forêt est aussi un lieu de vie et de biodiversité à préserver. ■ **L. C.**

Les impasses de la géo-ingénierie solaire

Ces technologies visent à détourner le rayonnement du Soleil pour refroidir la Terre. Mais de nombreux chercheurs s'opposent à ces solutions coûteuses qui pourraient avoir des répercussions désastreuses sur la machine climatique.

C'est le plus gros investissement public en matière de géo-ingénierie solaire : l'Agence pour la recherche avancée et l'invention (Aria), un organisme britannique public de financement de recherche et développement, a investi en mai dernier environ 52 millions d'euros dans 22 projets différents. Objectif : refroidir la Terre en augmentant de façon artificielle la quantité de rayonnement solaire réfléchie vers l'espace par la planète. Aussi appelée « modification du rayonnement solaire », la géo-ingénierie solaire ne s'attaque pas aux causes du réchauffement climatique, à savoir les émissions de gaz à effet de serre, mais cherche à atténuer, temporairement, ses symptômes (fonte des glaces, fréquence et intensité des phénomènes climatiques extrêmes, etc.).

Première approche : tenter d'imiter le phénomène de refroidissement observé à la suite d'une éruption volcanique explosive. En libérant environ 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre dans la stratosphère, l'éruption du mont Pinatubo en 1991, aux Philippines, avait provoqué l'année suivante un pic de refroidissement estimé entre 0,3 et 0,5 °C pendant deux à trois ans. Pour obtenir artificiellement un tel résultat, l'idée est de libérer dans la stratosphère des particules de dioxyde de soufre, de sulfates, de dioxyde de titane ou de carbonate de calcium, avec l'espoir de créer une fine couche qui réfléchirait une fraction de la lumière solaire entrante.

Autre approche : l'éclaircissement des nuages marins. Elle s'inspire de la modification des propriétés des nuages bas marins au contact des émissions provenant des navires. Les aérosols qui s'y trouvent augmentent le nombre de gouttelettes dans les nuages, ce qui les rend plus réfléchissants. Mais cette technologie est « *moins mature* » que l'injection d'aérosols, selon Peter Irvine, professeur assistant à l'Initiative d'ingénierie des systèmes climatiques de l'université de Chicago (États-Unis). Plus spéculatifs encore : l'éclaircissement des cirrus et la réflexion de la lumière depuis l'espace *(voir l'infographie)*.

Simples sur le papier, ces techniques sont très complexes à mettre en œuvre. Pour l'injection d'aérosols stratosphériques, une petite expérimentation de l'université Harvard (États-Unis) annulée en 2024 — le projet SCoPEx — envisageait de déployer un ballon stratosphérique relié à une nacelle équipée d'hélices. Mais pour un déploiement à l'échelle planétaire, il faudrait développer des avions capables d'atteindre la stratosphère à l'équateur (à partir de 17 km d'altitude) et de transporter le matériel nécessaire afin de libérer environ 12 millions de tonnes d'aérosols par an.

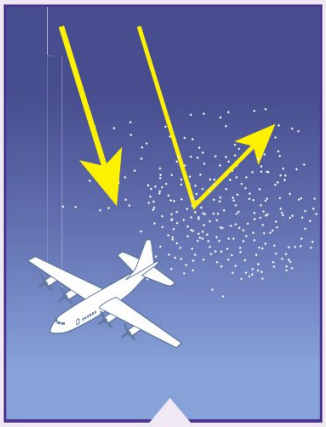
La géo-ingénierie solaire ne peut se substituer à l'atténuation

Au-delà des problèmes de faisabilité, la géo-ingénierie solaire pourrait-elle sauver le climat ? Dans la plupart des scénarios tirés du 6e rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), il faudrait agir en continu durant 150 à 300 ans pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, selon une étude publiée en 2023 dans *Earth System Dynamics*. Et une interruption des pulvérisations d'aérosols, avec des concentrations restées élevées en gaz à effet de serre, provoquerait un « choc terminal », soit un réchauffement global extrêmement rapide, deux à 15 fois plus rapide selon l'ampleur du déploiement.

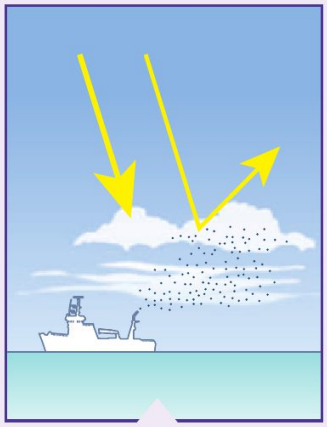
SOUTHERN CROSS UNIVERSITY

◀ **Depuis 2020, des chercheurs australiens** mènent des essais d'éclaircissement des nuages en vaporisant des particules de sel marin dans la basse atmosphère depuis des navires.

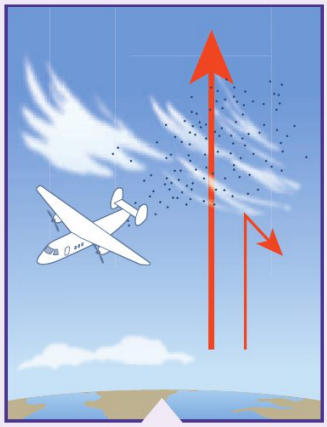
4 techniques pour abaisser les températures mondiales



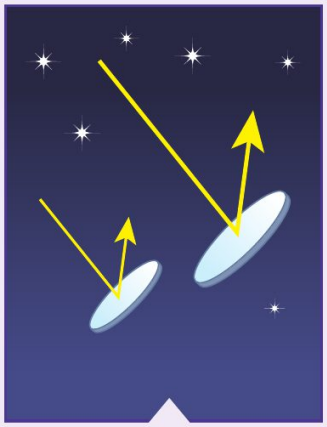
Injection d'aérosols stratosphériques Des particules de dioxyde de soufre pourraient réfléchir une petite fraction de la lumière solaire.



Éclaircissement des nuages marins Des particules de sel marin seraient pulvérisées à partir de navires pour améliorer la réflectivité des nuages bas.



Amincissement des cirrus L'ensemencement de particules permettrait à la chaleur terrestre de s'échapper vers l'espace.



Réflexion de la lumière depuis l'espace Des miroirs placés entre la Terre et le Soleil pourraient renvoyer la lumière solaire loin de la planète.

BRUNO BOURGEOIS

Conclusion : *« La géo-ingénierie solaire ne peut se substituer à l'atténuation. Nous ne pouvons pas en parler de manière responsable sans partir du principe qu'il y aura des actions d'atténuation substantielle à l'avenir »*, appuie Ben Kravitz, professeur des sciences de la terre et de l'atmosphère à l'université de l'Indiana à Bloomington (États-Unis). D'autant que les répercussions sur la machine climatique pourraient être importantes. Les régimes de précipitations et la circulation atmosphérique seraient très probablement modifiés, les pluies acides et les particules polluantes dans l'air augmenteraient, sans oublier que le rétablissement de la couche d'ozone serait ralenti, affirment les chercheurs.

« C'est l'argument premier contre un déploiement de ces technologies, et ce quelle que soit l'échelle », juge Raymond Pierrehumbert, professeur de physique planétaire à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), opposé aux expérimentations sur le terrain — huit projets sont connus au total dont cinq financés par Aria —, ajoutant qu'il n'existe aujourd'hui aucun cadre de gouvernance sur le sujet. *« Un tel accord de gouvernance internationale semble impossible, vu le système de gouvernance mondiale et la situation géopolitique actuelle. Et quelle instance pourrait garantir un contrôle multilatéral, équitable et efficace ? »*, s'interroge Aarti Gupta, professeure en gouvernance environnementale internationale à l'université de Wageningue (Pays-Bas), et l'une des initiatrices d'une lettre ouverte contre le déploiement de la géo-ingénierie solaire, signée par près de 600 chercheurs. *« Dans cinq à dix ans, nous en saurons plus sur les risques et bénéfices potentiels de la géo-ingénierie solaire, mais il n'y a aucun moyen d'éliminer totalement les risques, il y aura toujours des compromis à faire »*, précise Daniele Visioni, professeur en sciences de la Terre et de l'atmosphère à l'université Cornell (États-Unis). Soutenant qu'il est *« nécessaire de faire des modélisations climatiques combinées avec des facteurs socio-économiques »* pour obtenir des données utiles à la prise de décision, Roland Séférian, climatologue au Centre national de recherches météorologiques, estime toutefois que *« le vrai débat pourrait ne plus être les risques et bénéfices de la géo-ingénierie solaire, mais plutôt les dangers de ne rien faire face aux risques d'un déploiement. »* ■

Chisato Goya

WAGENINGEN UNIVERSITY

« Un accord de gouvernance internationale sur le sujet semble impossible, vu la situation géopolitique actuelle »

Aarti Gupta, professeure en gouvernance environnementale internationale à l'université de Wageningue (Pays-Bas)

Le renouveau de la mine en question

Au nord de l'Auvergne, l'extraction de lithium, un métal à la base des batteries des véhicules électriques, pourrait débuter en 2030 sous une carrière de kaolin. Ce projet hors norme signerait le retour de la mine en France. Mais l'impact environnemental a-t-il été bien évalué ?

L'ouverture dans le sol mesure plusieurs centaines de mètres de diamètre. Les parois sont taillées en escaliers irréguliers aux marches de géant. Sur l'une d'elles, une pelle mécanique est en action. Avec la régularité d'un métronome, elle puise dans le sol et emplit son godet d'une poudre blanchâtre, l'élève dans les airs et le renverse délicatement au-dessus de la benne d'un camion de chantier, puis elle recommence. Depuis le haut d'un flanc de l'exploitation, la deuxième pelle mécanique en contrebas paraît minuscule tant elle est loin. L'argile blanche et friable qui jonche le sol autour de nous s'appelle kaolin de Beauvoir. Il sert à fabriquer de la porcelaine et est exploité au lieu-dit La Bosse, à Échassières, dans l'Allier, depuis 1852. Si la mine devait faire son retour en France métropolitaine dans les prochaines années, ce serait ici, dans le sous-sol de cette carrière. Le 25 septembre, le préfet a donné l'autorisation environne-

ABC/ANDIA.FR

La carrière de kaolin située à Échassières, dans l'Allier, où pourrait démarrer l'exploitation minière de lithium à partir de 2030.

BRUNOBOURGEOIS

mentale pour des phases de test d'une galerie minière. La distinction entre mine et carrière dépend seulement de la nature du minerai exploité dans le droit français — les métaux, comme le lithium, et les combustibles fossiles, comme le charbon, appartiennent au régime des mines, tandis que les matériaux de construction appartiennent à celui des carrières. Emili (pour « Exploitation de mica lithinifère par Imerys »), c'est le nom choisi par la multinationale Imerys pour son projet de mine souterraine de lithium qui pourrait débuter en 2030. En changeant de statut, l'exploitation d'Échassières changerait complètement d'échelle. En 150 ans, environ 2 millions de tonnes de roches ont été extraites de la carrière de kaolin de Beauvoir ; au pic de production du projet Emili, la même quantité serait extraite en… un an !

Voilà 25 ans qu'il n'y a plus de mine métallique sur le territoire métropolitain. Une situation devenue peu viable depuis de récents choix politiques. En juillet 2021, la Commission européenne veut interdire la vente de voitures thermiques neuves d'ici à 2035. Le cours du lithium, métal stratégique pour les batteries des véhicules électriques, s'envole alors, connaissant une hausse de 400 % en un an. L'augmentation se poursuit en 2022, alors que la proposition est adoptée. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit que la demande mondiale de lithium va encore être multipliée par neuf d'ici à 2040, voire par 40 dans un scénario où les équipements bas carbone se développent partout dans le monde. Par ailleurs, en 2024, l'Europe adopte le Critical Raw Materials Act : le Vieux Continent devra, d'ici à 2030, puiser de son territoire 10 % de sa consommation en matières premières critiques (dont fait partie le lithium). Elle désigne alors des projets stratégiques de nouvelles mines, parmi lesquels figure Emili.

C'est ainsi que, sous la carrière de kaolin, le granite de Beauvoir a pris de la valeur. En cristallisant il y a 308 millions d'années, le magma qui en est à l'origine s'est chargé en minéraux rares, parmi lesquels le lépidolite, riche en lithium. Imerys annonce un gisement de 373 millions de tonnes avec une teneur moyenne en lithium de 1 %. Une telle masse est comparable à celle de tous les êtres humains vivants.

Pour produire 1 kg de lithium, il faut :

12 kg
de produits chimiques

35 litres
d'eau

Et cela génère

99 kg
de déchets miniers

Du lithium pour 700 000 batteries chaque année

À partir du granite, l'entreprise prévoit de passer à l'hydroxyde de lithium, l'un des composés chimiques de certaines batteries lithium-ion — le lithium n'étant jamais utilisé pur car il est trop instable dans cet état. Quatre étapes sont nécessaires : l'extraction, dans une mine souterraine située entre 75 et 400 mètres de profondeur ; la concentration, dans une usine, afin d'extraire le lépidolite du granite ; et enfin, le transport du minerai concentré jusqu'à Montluçon, où se trouve l'usine de conversion permettant d'obtenir l'hydroxyde de lithium. Chaque année, serait produit de quoi approvisionner 700 000 nouvelles batteries de véhicules électriques. Tout ceci aura un impact environnemental. Un plateau calcaire s'étend en contrebas du futur emplacement de la mine. Au milieu d'un champ fraîchement labouré, une maisonnette en pierre abrite une source canalisée dans une fontaine qui coule en continu. Quelques centaines de mètres plus loin, les vaches de Jean-Luc Peronnet paissent et viennent s'abreuver dans une nouvelle résurgence. Partout dans les propriétés alentour, des puits ou des sources dans les jardins. *« Ici, on vit encore comme dans* Manon des sources, s'amuse l'éleveur, *si l'eau cesse de couler chez quelqu'un, c'est la crise. »* Au-delà de la boutade, il y a une réalité. Les sources de Jean-Luc Peronnet ont déjà été fortement affectées par les sécheresses des derniers étés. Pour la

JÉRÔME CHABANNE / HANS LUCAS

Le granite extrait de la carrière d'Échassières ne contient que 1 % de lithium environ (test de carottage effectué par le groupe Imerys).

première fois de sa vie, il les a vues se tarir quelques jours. Si la situation se reproduisait et durait trop longtemps, son élevage ne serait plus rentable ; il serait forcé de se séparer de son troupeau.

Menace sur les nappes phréatiques et la qualité de l'eau

Or, les mines altèrent les équilibres hydrogéologiques locaux. Lorsqu'on creuse un trou toujours plus large et profond, on finit par tomber sur l'eau. Pour l'exploitant minier c'est un embarras. Il faut pomper avant de continuer à exploiter le gisement. Tout ceci modifie le réseau hydrologique souterrain et fait baisser le niveau des nappes phréatiques alentour. *« Là où se situe la carrière de kaolin de Beauvoir, l'eau se trouve dans la surface poreuse, entre 0 et 50 mètres de profondeur, tandis que notre exploitation pour le lithium se fera en dessous de 75 mètres, dans un granite qui est imperméable »*, rassure Patrick Fullenwarth, géologue chez Imerys. Toutefois, l'imperméabilité entre la partie poreuse du dessus et la partie granitique inférieure est imparfaite. Cette dernière contient des fracturations, dans lesquelles l'eau s'infiltre. Ainsi, les nappes seront en partie drainées, mais cela n'a pas encore été quantifié. Dans une étude d'impact, Imerys juge que le projet Emili pourrait avoir *« une incidence résiduelle indirecte permanente faible à potentiellement modérée »* concernant la baisse du niveau des nappes.

Se pose aussi la question du partage de la ressource en eau. Pour le déroulement du procédé industriel, Emili utiliserait 1,2 million de m^3 d'eau chaque année, soit la consommation annuelle de 21 000 Français. Ce volume servirait à combler les pertes d'un circuit fermé dans lequel Imerys annonce recycler l'eau à 90 %. Enfin, une mine affecte la qualité de l'eau environnante, en raison du ruissellement sur les déchets miniers. Ces deux composantes — déchets et eau — sont le cœur des problématiques minières. *« Et ce sont des sujets pour lesquels il est difficile de changer de cap une fois que le projet est lancé,* assure Yann Gunzburger, professeur en géosciences à l'université de Lorraine. *Il est nécessaire de bien concevoir le projet au départ, car il est ensuite difficile de faire des corrections importantes. »*

Une disproportion vertigineuse de déchets

La teneur en lithium du gisement de Beauvoir est de 1 %. Si le projet advient, Emili produira donc 99 % de déchets. Une disproportion vertigineuse, mais à l'image de ce qui se fait dans les mines métalliques du monde entier. Pire encore, une fois extraites, les 373 millions de tonnes du gisement de Beauvoir n'auront plus le même volume. Un mètre cube de granite, une fois broyé, fait 1,7 mètre cube. Une partie sert à reboucher le trou de la mine, mais une part immense doit être stockée ailleurs. Cette opération n'est pas neutre. Les débris forment un immense amas de poussières, dont certaines sont riches en métaux lourds, et peuvent, en s'envolant, aller se déposer dans les parcelles voisines et polluer les terres. De même, cette poudre peut contaminer les eaux souterraines, par dissolution : en percolant dans les déchets, les eaux pluviales se chargent en métaux lourds avant de se mélanger aux nappes phréatiques.

EXTRACTION

Stabiliser la mine, une opération délicate

La technique minière choisie pour le projet Emili s'appelle l'abattage par sous-niveau. Elle consiste à creuser de premières galeries horizontales dans la partie la plus basse du gisement, puis d'en faire s'effondrer le plafond en le dynamitant. Ensuite, on creuse de nouvelles galeries dans les niveaux supérieurs et on recommence. Pour maintenir la stabilité du gisement et confiner les résidus, il est préférable de remblayer une partie des cavités avec une pâte composée de déchets miniers, d'eau et de ciment, ce que prévoit de faire Imerys. Si cette pratique est éprouvée, notamment dans les mines canadiennes, et s'avère vertueuse quand elle est bien réalisée, elle présente aussi des risques dès lors que le mélange n'est pas suffisamment homogène ou durcit de façon irrégulière.

RÉGULATION

Un manque d'expérience en matière de contrôle des mines

La mine demande une adaptation permanente. Paradoxalement, un gisement n'est parfaitement connu qu'une fois l'exploitation terminée. Avant, il peut toujours réserver son lot de surprises. Cependant, en pratique, *« la grande majorité des impacts (sur le sol, l'air, l'eau ou sur l'humain) sont maîtrisables. Le problème n'est donc pas technique, mais de gestion, de surveillance, de seuils qu'on tolère et des moyens que l'on met en œuvre pour que les engagements soient respectés »*, assure Yann Gunzburger, professeur de géosciences à l'université de Lorraine.
Pour réaliser ce suivi, encore faut-il avoir l'expertise technique nécessaire. *« Ce sont des sujets qui nous ont préoccupés avec les collègues,* avoue le professeur. *L'expertise a diminué ces dernières décennies. Mais elle a survécu. »* La direction régionale de l'environnement (Dreal) Auvergne-Rhône-Alpes, qui jouerait le rôle de police des mines si Emili voyait le jour, se veut rassurante : *« Plusieurs exploitations souterraines sont en activité et ont permis de maintenir une compétence au sein de l'administration. »* Le manque d'expérience de la France en matière de contrôle des mines reste malgré tout criant. Et la réglementation, si elle a connu une réforme importante en 2021, *« n'est pas alignée avec les meilleures pratiques et normes internationales,* affirme Pierre Petit-De Pasquale, directeur des standards d'Irma. *Comme tous les autres pays du monde, la France n'exige pas le même niveau de transparence que le standard Irma sur les questions de santé, sécurité, gouvernance fiscale, droit du travail, gestion des risques, ou encore de pollution ; c'est une faiblesse majeure. »*

Des précautions sont donc nécessaires, mais le dossier de l'industriel est flou sur ce point. *« Dans leur étude d'impact, Imerys n'a qualifié aucun déchet,* déplore Cécile P., ingénieure géotechnicienne et membre de l'association Préservons la forêt des Colettes, qui lutte contre le projet. *Pourtant, on sait que ces roches sont chargées en béryllium, fluor, thorium, niobium. Ce sont des métaux moins connus pour leur toxicité que l'arsenic ou le plomb, mais qui sont tout aussi délétères. »* L'entreprise n'a pas non plus annoncé où ses déchets seraient stockés à long terme. L'information est d'autant plus importante pour ce qui sortira de l'usine de conversion, car ce sont des résidus particulièrement concentrés en métaux lourds et pollués par diverses substances chimiques utilisées pour extraire le lithium, comme les acides chlorhydrique et sulfurique. Tout cela viendrait se cumuler aux pollutions déjà existantes sur un territoire où le passé minier a laissé des stigmates. En 2018, un rapport de Géoderis analysait les sous-sols d'une zone géographique dans laquelle se trouve la carrière de kaolin et concluait à des teneurs trop importantes en divers métaux lourds, *« susceptibles de présenter un risque très significatif pour la santé humaine et l'environnement »*.

MINES NANCY

« Il est nécessaire de bien concevoir le projet au départ, car il est ensuite difficile de faire des corrections importantes »

Yann Gunzburger, professeur en géosciences à l'université de Lorraine

Les dangers de la mine sont éprouvés quasi quotidiennement dans le monde : *« même dans des pays riches avec une réglementation forte, les atteintes aux droits humains et les problèmes de pollution arrivent trop régulièrement »*, regrette Pierre Petit-De Pasquale, directeur des standards d'Irma, une organisation internationale indépendante et paritaire qui évalue les pratiques socio-environnementales des mines. Face à cette réalité, c'est la capacité des autorités françaises à réguler qui sera mise à l'épreuve (*lire l'encadré ci-dessus*). Et l'enjeu d'Emili dépasse la question des répercussions locales. En tant qu'il pourrait symboliser le retour de la mine en France, ce projet donnerait un cadre pour ceux à venir. Car bien d'autres sont en germe. On dénombre déjà au moins neuf permis exclusifs de recherche (PER) pour du lithium (dans le Bas-Rhin, le Haut-Rhin, la Haute-Vienne et l'Allier), auxquels il faut ajouter les demandes de PER qui continuent à fleurir sur le territoire. ■

Loïc Duthoit

Le compostage funéraire, une alternative écologique

Un programme de recherche va étudier les avantages de la terramation, un procédé de décomposition des corps après la mort qui pourrait avoir des avantages environnementaux par rapport aux pratiques traditionnelles, inhumation ou crémation.

Un terrain situé à l'université de Bordeaux devrait accueillir des hôtes particuliers au printemps 2026 : des cadavres de porcs. Issus de la recherche biomédicale, ils vont être utilisés dans le cadre du projet F-Compost (F pour funéraire), piloté par les universités de Lille et de Bordeaux, avec l'association Humo Sapiens. Objectif : tester et documenter une technique de terramation, un procédé alternatif de réduction de corps censé être plus écologique que l'inhumation et la crémation, les deux seuls modes de sépulture légaux en France. Selon le baromètre « Les Français et les obsèques » réalisé par le Crédoc en 2024, une personne sur cinq serait tentée par la terramation. Expérimentée depuis 2024 en Allemagne, elle est autorisée dans 14 États américains, où l'entreprise pionnière Recompose la pratique depuis fin 2020.

Le projet F-Compost a débuté fin juin sur une parcelle destinée aux déchets verts du cimetière de l'Orme-à-Moineaux, aux Ulis dans l'Essonne. Quatre brebis mortes et dépecées de 35 kg ont déjà été placées dans des fosses de 80 cm de profondeur, entourées et recouvertes de broyat végétal fraîchement coupé, alors que quatre autres ont été inhumées (sans cercueil, qui constitue une obligation légale pour les humains) pour faire une étude comparative. *« Des capteurs ont été attachés à chacune pour mesurer, toutes les heures pendant un an, la température, l'humidité et l'état des sols. D'autres capteurs en surface enregistrent les composés organiques volatils »*, précise Damien Charabidzé, professeur au Centre d'histoire judiciaire à l'université de Lille et responsable du projet F-Compost.

Les micro-organismes présents sur le broyat, le corps ou le sol consomment la matière végétale riche en carbone, et les protéines animales riches en azote. *« Plus le broyat est frais, plus il y a de sucres simples, facilement digestibles par les micro-organismes. Un broyat frais, avec un taux d'humidité proche de 65 %, monte ainsi au-dessus de 50 °C en quelques jours »*, explique Fabien Puzenat, maître-composteur pour F-Compost et responsable de la recherche à Humo Sapiens, qui souhaite la légalisation de la terramation en France.

Une décomposition naturelle sans mauvaises odeurs

Cette activité microbienne entraîne une décomposition naturelle, qui, dans un an, devrait produire de l'humus, une terre riche en minéraux et capable de stocker l'eau. *« Contrairement à l'inhumation qui appauvrit les sols, la terramation est censée les régénérer en créant de l'humus »*, indique Damien Charabidzé. Quand un corps est inhumé, la putréfaction qui s'ensuit *« génère des composés soufrés —putrescine, cadavérine, scatol — qui sentent très mauvais et peuvent être toxiques, du méthane ou des nitrites* [pollution organique des sols] », ajoute-t-il. La terramation, elle, ne devrait pas créer de mauvaises odeurs car *« le broyat végétal permet l'oxygénation et joue un rôle de filtre »*. Si ce n'était pas confirmé, *« cela ne serait pas un procédé funéraire acceptable »*, note Sacha Kacki, archéo-anthropologue à l'université de Bordeaux. Quel sera l'état de dégradation

DAMIEN CHARABIDZÉ

« Contrairement à l'inhumation qui appauvrit les sols, la terramation est censée les régénérer en créant de l'humus »

Damien Charabidzé, professeur au Centre d'histoire judiciaire à l'université de Lille et responsable du projet F-Compost

THOMAS LOUAPRE/DIVERGENCE

Dans une zone expérimentale aux Ulis (Essonne), les chercheurs Damien Charabidzé et Fabien Puzenat déposent des cadavres de brebis dans des fosses tapissées de broyat végétal afin d'analyser scientifiquement la terramation.

des brebis dans un an ? *« Il est possible qu'il ne reste plus que les os. La partie organique de l'os va-t-elle disparaître plus vite avec la terramation ? C'est une question importante, car c'est dans cette fraction qu'il peut rester des pathogènes »*, s'interroge le chercheur.

Marcus Schwarz, entomologiste-légiste à l'Institut de médecine légale de l'université de Leipzig (Allemagne), certifie que la technique de terramation de la société Meine Erde permet d'obtenir *« un squelette propre en 40 jours »*, et que l'état des os est *« celui que l'on observe après 20 à 50 ans d'inhumation »*. Mais pour arriver à ce résultat, le corps doit être placé dans un récipient bercé mécaniquement, où la température, l'humidité et l'oxygénation sont contrôlées, pour accélérer la décomposition. F-Compost conduira à *« des résultats très différents »*, car il s'agit de cadavres animaux, enterrés en milieu naturel. En Allemagne, l'humus et les os sont broyés et l'ensemble est enterré dans un cimetière à 50-60 cm de profondeur pour nourrir les sols.

Aux États-Unis, la terre peut être dispersée par la famille ou utilisée comme engrais. Hormis l'aspect juridique lié à la question de la dignité du corps, *« cela serait quelque chose d'inimaginable en France, vu notre éducation judéo-chrétienne »*, estime Fabienne Gourserol, directrice du Syndicat intercommunal du cimetière-crématorium de l'Orme-à-Moineaux.

Sylvestre Olgiati, président du Syndicat de l'art funéraire, n'imagine pas de légalisation de la terramation avant *« au moins 15 ans »*, quand *« le législateur devra se pencher sur le manque d'espace foncier dans les cimetières »*. Selon Fabienne Gourserol, la terramation pourrait régler ce problème : *« S'il est prouvé que la décomposition est plus rapide, cela permettrait de faire tourner les emplacements plus souvent. »* ■ **Chisato Goya**

POLLUTION

Une empreinte carbone encore à évaluer

En France, l'empreinte carbone de l'inhumation est estimée à 233 kg d'équivalent CO_2 (caveau, monument funéraire et fleurs artificielles), contre 199 kg d'équivalent CO_2 pour la crémation (gaz, immobilisation des fours, filtration des effluents, urne, cavurne, monument cinéraire et fleurs artificielles), selon une étude de 2024 menée par le cabinet d'expertise climatique OuiACT à la demande du Syndicat de l'art funéraire. Pour la terramation, « *l'empreinte carbone devrait être moindre car il n'y aurait pas de caveau, pas de pierre tombale comme pour l'inhumation et pas besoin de fours qui chauffent à 800 °C comme pour la crémation. De plus, la matière issue du processus est riche en carbone stable et va donc permettre d'en stocker dans le sol* », détaille Fabien Puzenat, responsable de la recherche à Humo Sapiens.

Quelle quantité pour une portion ?

Une portion de fruit ou de légume correspond à la taille d'un poing humain, soit entre 80 et 100 g. Ils peuvent être frais, surgelés ou en conserve. Pour les conserves, préférez celles sans sucre ajouté et peu salées.

1 orange

6 tomates cerises

2 kiwis

1/2 aubergine

2 tranches d'ananas

2 bouquets de brocoli

1 carotte

1 pomme

1/2 avocat

1/2 pamplemousse

1 tranche de melon

1/3 concombre

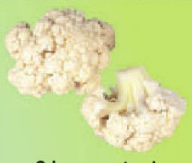
1 tranche de pastèque

1 artichaut

1 banane

15 grains de raisin

10 champignons de Paris


2 bouquets de chou-fleur

10 mûres

1 endive

3 figues

1/2 betterave

3 à 4 tiges de blette

1 poivron

6 asperges

1 courgette

6 fraises

1 petite assiette de haricots verts

1 poireau

2 abricots

1 navet

10 à 15 cerises

1 bol de fruits en conserve

1 poire

1/2 fenouil

4 choux de bruxelles

2 clémentines

6 noix

2 palets de 50 g d'épinards surgelés

100 g de légumes en conserve

1 bol de soupe de légumes

1 bol de salade

10 radis rouges

20 framboises

SHUTTERSTOCK

5 fruits et légumes par jour
Décryptage d'un slogan

Ce conseil repose sur un consensus scientifique international : la consommation régulière de cinq portions de fruits et légumes a un effet protecteur contre les maladies cardio-vasculaires et certains cancers. Pourtant, 25 ans après le lancement de cette campagne en France, le constat d'échec est patent. Les autorités sanitaires tentent de promouvoir des messages moins culpabilisants.

Par Isabelle do O'Gomes

« *Mangez au moins cinq fruits et légumes par jour !* » Le slogan est connu des trois quarts des Français. Pourtant, vingt-cinq ans après son lancement, il sonne comme une incantation vaine : au printemps dernier, le baromètre de Santé publique France révélait que 73 % des 18-24 ans n'atteignaient pas cette recommandation. *« Même chez les 65-85 ans, plus attentifs aux messages de prévention, seuls 46 % la respectent »*, précise la chercheuse Valérie Deschamps, coautrice de l'étude. À travers cet objectif facile à retenir, le premier Programme national nutrition santé (PNNS), lancé en 2001, espérait à l'origine réduire de 25 % le nombre de « petits consommateurs » (1,5 portion par jour). Car, après avoir presque doublé entre 1950 et 1995, la consommation de fruits et légumes des Français s'était figée à partir de 1996, avant de refluer légèrement. La campagne visait donc à relancer la dynamique. Et elle a marqué les esprits : *« En 2002, seuls 2,5 % des Français connaissaient cette recommandation. Trois ans plus tard, ils étaient déjà 35 %, et l'obligation de l'afficher en bas des publicités, instaurée en 2007, a encore renforcé sa notoriété »*, illustre Corinne Delamaire, chargée d'expertise en promotion de la santé à Santé publique France.

Mais une première étude (Esteban) est venue doucher l'enthousiasme des débuts : en 2014-2015, près de 90 % des adultes ne consommaient toujours pas assez de fruits et légumes pour couvrir leurs besoins ▸

PRÉVENTION

Les fibres alimentaires, un allié incontournable

Si les autorités sanitaires recommandent de manger chaque jour des fruits et des légumes, c'est parce qu'ils sont une source importante de fibres. En moyenne, ces aliments en apportent entre 0,5 et 4 g pour 100 g. En 2016, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) a fixé les apports conseillés pour un adulte en bonne santé à 30 g par jour. Cet objectif repose sur des études montrant que ce niveau de consommation contribue à réduire les risques de maladies cardio-vasculaires, de diabète de type 2 et de certains cancers, comme ceux du côlon-rectum et du sein. Cependant, fruits et légumes ne sont pas les aliments les plus concentrés en fibres. Les légumineuses en fournissent en moyenne 17,8 g pour 100 g, les céréales complètes environ 10,5 g et les fruits oléagineux comme les noix ou les amandes autour de 8 g. Il est donc essentiel de diversifier ces apports pour atteindre les recommandations.

Les fibres possèdent aussi de nombreux autres bénéfices : elles limitent l'absorption des sucres et des graisses, contribuent ainsi au contrôle de la glycémie et à la diminution du « mauvais » cholestérol, procurent une satiété durable, régulent l'appétit et favorisent un bon transit intestinal.

en fibres, observe Valérie Deschamps. Les derniers résultats de Santé publique France font même état d'un recul depuis cette date.

Sur le terrain, la sociologue Faustine Régnier, de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), constate que les classes intermédiaires ont d'abord été très réceptives à la recommandation de consommer davantage de fruits et légumes, y voyant à la fois un enjeu de santé et un marqueur social, malgré des contraintes de budget et de temps. Mais avec l'essor des réseaux sociaux, une partie d'entre elles s'informe désormais en ligne, au risque de relativiser ou de contourner ces messages de santé publique. Les catégories modestes, elles, s'en sont rapidement détournées : freinées par le prix, par l'image austère des fruits et légumes et par la défiance à l'égard de messages jugés culpabilisants. Les catégories aisées sont finalement les seules à avoir largement intégré la recommandation, dans la continuité de pratiques déjà orientées vers le bien-être et la santé, détaille la chercheuse dans son dernier ouvrage, *Distinctions alimentaires* (PUF, 2025). De surcroît, l'étude de Santé publique France *« suggère qu'il existe un lien entre un faible niveau de diplôme et une consommation réduite de fruits et légumes, ces consommations étant particulièrement basses dans les régions les plus touchées par la pauvreté, comme les Hauts-de-France »*, souligne l'économiste de la santé Pierre Levasseur (Inrae).

MARTAT

En 1972, le North Karelia Project, en Finlande, fut le premier projet de santé publique au monde. Il permit de réduire la mortalité cardio-vasculaire au travers de l'alimentation.

Une idée vieille de trente ans qui n'a pas cessé de s'affiner

Pourtant, l'idée de consommer cinq fruits et légumes par jour n'a rien d'hexagonal. Ce conseil repose sur un consensus scientifique international, affiné depuis plus de trente ans. *« Les études épidémiologiques ont montré un effet protecteur contre les maladies cardio-vasculaires et certains cancers gastro-intestinaux,* affirme Elio Riboli, responsable de la cohorte européenne Epic et professeur à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni). *Les analyses biologiques révèlent que les*

PATRICK ALLARD/REA

Les opérations « nutrition santé » en milieu scolaire visent à prévenir l'obésité chez les plus petits. Selon l'Unicef, celle-ci touche un enfant sur dix dans le monde.

gros consommateurs présentent aussi un meilleur équilibre de marqueurs métaboliques comme le cholestérol, l'inflammation ou la glycémie. » L'effet protecteur est solide, même s'il reste bien moindre que celui obtenu en arrêtant tabac ou alcool. Le lien le plus remarquable concerne les maladies cardio-vasculaires, concluait en 2016 un rapport de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), avec un niveau de preuve jugé convaincant. L'agence mentionnait aussi, de façon plus suggestive, une possible baisse du risque de surpoids, de diabète et de certains cancers.

L'idée de prévenir certaines pathologies en modifiant son comportement quotidien, notamment sur le plan alimentaire, a même précédé avec succès les preuves scientifiques de l'efficacité de la démarche. L'une des expériences pionnières les plus emblématiques est le North Karelia Project, lancé en Finlande en 1972. À l'époque, la Carélie du Nord, région rurale, détient le taux mondial le plus élevé de mortalité masculine liée aux maladies coronariennes. Pour répondre à cette situation alarmante, les autorités sanitaires déploient un programme de santé publique d'envergure. Ses objectifs : réduire la consommation de graisses saturées (beurre, lait entier), limiter l'usage du sel et mener une lutte active contre le tabagisme. Le bilan est spectaculaire : *« Entre 1969 et 2011, la mortalité cardio-vasculaire des hommes de 35 à 64 ans a chuté de plus de 80 % en Carélie du Nord comme dans l'ensemble du pays* », rappelle une synthèse publiée en 2020 dans l'*American Journal of Lifestyle Medicine*.

Face à ces résultats, tous les espoirs semblaient permis. *« Dès les années 1970, une accumulation de données suggérait qu'un régime méditerranéen, riche en fruits et légumes, réduisait le risque cardio-vasculaire. Nous pensions aussi qu'il pouvait diminuer de 40 à 50 % certains cancers* », se souvient Elio Riboli, alors jeune chercheur au Centre international de recherche sur le cancer (Circ), à Lyon. Un espoir renforcé par les travaux publiés en 1981 par les épidémiologistes Richard Doll et Richard Peto dans le *Journal of the National Cancer Institute*. L'enthousiasme est tout aussi marqué outre-Atlantique. En octobre 1979, le National Cancer Institute (NCI) identifie un régime riche en graisses et pauvre en fibres — celles présentes en abondance dans les légumes — comme un facteur de risque de cancers. Cinq ans plus tard, il lance un appel d'offres d'environ deux millions de dollars pour financer des projets de prévention.

Le slogan né en Californie en 1988 sera validé par la science

« Nous avons remporté l'une des neuf subventions, avec un projet centré sur la promotion de la consommation de fruits et légumes », se remémore Susan Foerster, alors responsable au département de santé publique de Californie. Trois ans plus tard, en 1988, la Californie devient le premier État américain à lancer une campagne en faveur des fruits et légumes. Restait à trouver un slogan. *« Le NCI parlait de quatre portions quotidiennes, mais les études les plus récentes montraient qu'il en fallait six ou sept pour réduire au mieux les risques de cancers et de maladies cardio-vasculaires* », développe-t-elle. Une enquête téléphonique avait révélé que les Californiens n'en consommaient en moyenne que deux à deux portions et demie. *« Cinq nous paraissaient un objectif réaliste* », résume sa collègue Lorelei DiSogra. Ce sera donc « 5 a day » — « cinq par jour ». Le slogan fait mouche : en 1991, le NCI transforme l'initiative en campagne fédérale, « 5 a day for better health », sous la pression de l'industrie agroalimentaire des fruits et légumes et des supermarchés.

Y. JOLY, SADAPT

« Une étude suggère qu'il existe un lien entre un faible niveau de diplôme et une consommation réduite de fruits et légumes »

Pierre Levasseur, économiste de la santé à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)

CONSEILS

Les jus de fruits et les fruits secs ne valent pas une portion

Manger *« cinq fruits et légumes par jour »* signifie, dans le détail, consommer chaque jour trois portions de légumes et deux de fruits, ou bien quatre de légumes et un fruit. Depuis l'avis de 2016 de l'Anses, le jus de fruits, même pur, n'est plus comptabilisé comme un fruit : il contient autant de sucre que les sodas et peu de fibres. Les fruits secs, riches en glucides simples, doivent être consommés avec modération. Quant aux produits transformés, comme un yaourt ou un biscuit à la fraise, ils ne valent pas une portion : les analyses montrent qu'ils contiennent bien plus de sucre ajouté que de fruit. En revanche, la compote sans sucre ajouté compte comme un fruit.

L'essentiel est aussi de varier ses apports. Fruits et légumes sont plus ou moins riches en vitamines (B, C, E, bêta-carotène), en minéraux (potassium, calcium, sélénium…), mais aussi en composés protecteurs (polyphénols…). Ces substances agissent en synergie : elles renforcent l'immunité, réduisent la pression artérielle, modulent le cholestérol,

Q. DE GROEVE / HANS LUCAS / AFP

Même pur à 100 %, le jus de fruits n'est pas considéré comme un fruit.

exercent une action antioxydante et peuvent même présenter des effets antibactériens ou antiviraux, comme le montrait déjà une étude de 1999 parue dans *The American Journal of Clinical Nutrition*. Le Pr Benoît Chassaing, chercheur à l'Institut Pasteur, propose donc d'aller plus loin : remplacer *« cinq fruits et légumes par jour »* par *« 25 fruits, légumes et légumineuses différents par semaine »*, un slogan destiné aussi à favoriser un microbiote sain.

L'intuition des « cinq portions par jour » est rapidement validée par la science. Dès 1990, un rapport d'experts de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) établit le lien entre consommation de fruits et légumes et prévention de certains cancers, avec des recommandations chiffrées issues d'études épidémiologiques. L'OMS fixe un seuil d'au moins 400 grammes quotidiens — soit cinq portions de 80 g — hors pommes de terre et tubercules. Contrairement à d'autres aliments, aucun seuil maximal n'est défini.

En France, d'autres préoccupations alimentaires dominent. En mars 1991, le premier cas de « vache folle » est détecté : le public découvre que les bovins reçoivent aussi des compléments d'origine animale, de quoi susciter une profonde défiance. Pour y répondre, des États généraux de l'alimentation sont organisés en 1999, axés sur la sécurité et la qualité. *« Nous en avons profité pour promouvoir un programme national de prévention, sur lequel nous travaillions déjà depuis deux ans »*, raconte Serge Hercberg, futur directeur du PNNS. Jusqu'alors, la prévention relevait surtout du Comité français d'éducation pour la santé (CFES), centré sur l'alcool et le tabac. *« Nous étions en retard par rapport aux autres pays, protégés pensions-nous par le French Paradox, c'est-à-dire le taux de mortalité cardiovasculaire faible en France malgré une alimentation riche en graisses saturées »*, relate l'épidémiologiste.

L'information ne suffit pas, il faut aussi une réglementation

Du côté des fruits et légumes, une seule campagne nationale avait vu le jour. En 1999, l'interprofession Interfel lançait une première campagne recommandant *« dix fruits et légumes frais par jour »*. En 2001, le PNNS fixait une consigne plus réaliste : *« au moins cinq par jour »*, quelle que soit leur forme (frais, surgelés, en conserve…). Mais le message montre vite ses limites. Depuis 2019, les autorités ont opté pour une stratégie des « petits pas », sans chiffre précis, complétée en 2023 par un repère visuel : une portion correspond à la taille d'un poing fermé. Aux États-Unis aussi, le slogan « 5 a day » a été abandonné au profit d'une présentation de portions autour d'une assiette complète.

« Même si les résultats ne sont pas à la hauteur de nos espérances, les Français sont davantage conscients de l'impact de leur alimentation », observe Serge Hercberg. Mais il prévient : *« L'information ne suffit pas. La réglementation et l'encadrement seront centraux, car espérer un changement durable dans l'environnement obésogène actuel serait illusoire. »* Et d'ajouter : *« Il faut aussi lutter contre les inégalités sociales qui se creusent. »* Pour autant, rappelle Elio Riboli, le conseil reste fondé : *« l'effet protecteur augmente avec la consommation. 600 à 800 g par jour réduisent nettement le risque de cancers et de maladies cardiovasculaires »*, citant une vaste méta-analyse de 2017 dont il est coauteur. ■

PALAIS DE LA PORTE DORÉE

MIGRATIONS & CLIMAT

COMMENT HABITER NOTRE MONDE ?

Nick Brandt, *Petero by Cliff*, Fiji, 2023. © Nick Brandt / Courtesy Polka Galerie

EXPOSITION ARTISTIQUE & SCIENTIFIQUE

17 OCTOBRE 2025 > 5 AVRIL 2026

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

AFD

MER COMMUN

POLKA arte Reporterre SCIENCES AVENIR Konbini BeauxArts Le Monde NouvelObs

On a fait naître des bébés avec trois ADN

Afin de diminuer le risque de survenue d'une maladie très handicapante chez l'enfant, plusieurs femmes ont bénéficié d'un « don » de mitochondries saines. Une manipulation du patrimoine génétique autorisée uniquement au Royaume-Uni et en Australie.

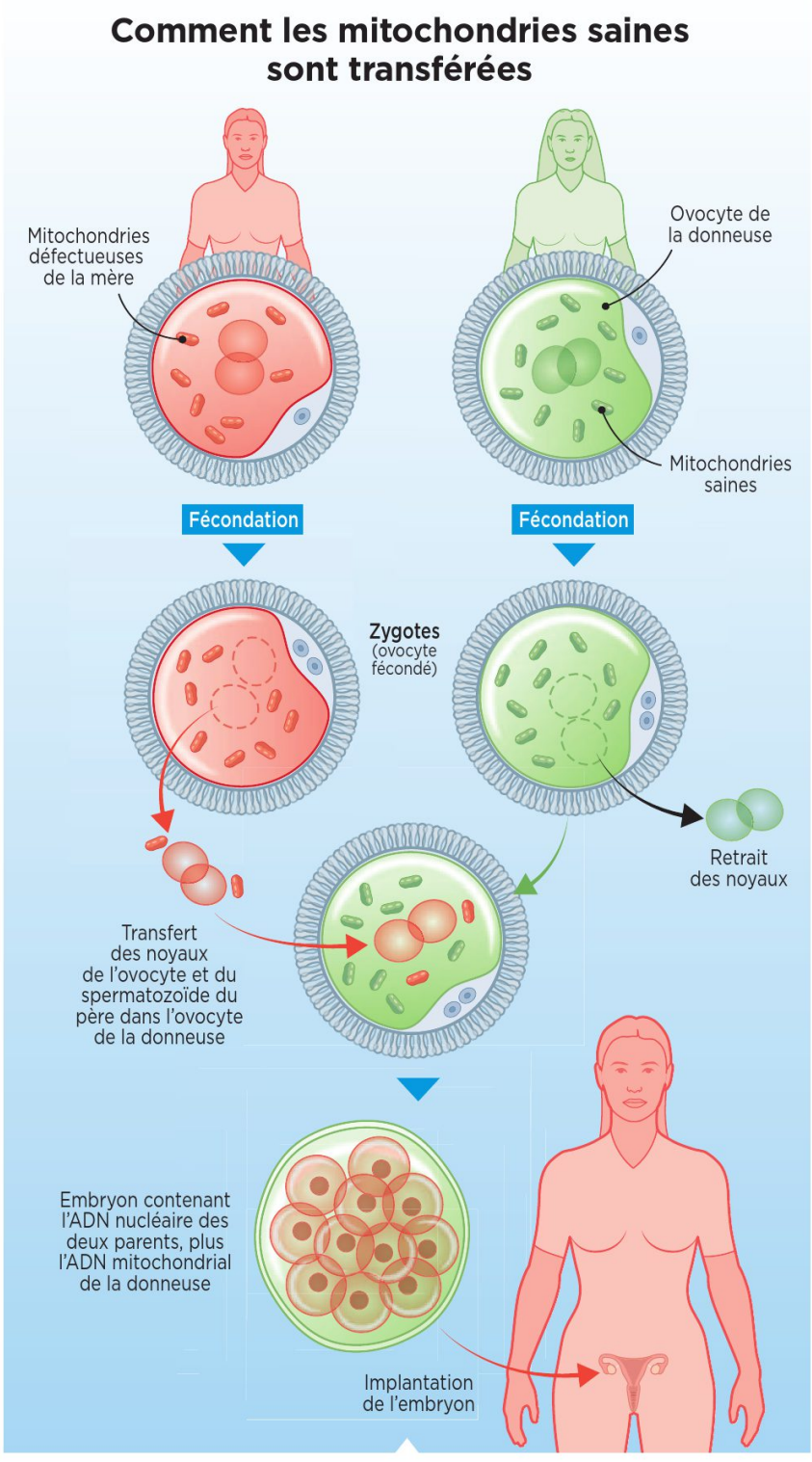
Au mois de juillet dernier a été rendue publique, dans la revue *New England Journal of Medicine*, la naissance de huit enfants un peu particuliers. Nés dans le centre de fertilité de Newcastle (Royaume-Uni), ces quatre garçons et quatre filles âgés de quelques mois à 2 ans ne sont pas seulement porteurs des patrimoines génétiques de leur père et de leur mère comme tout un chacun. Ils détiennent également dans leurs cellules celui d'un troisième donneur. Trois ADN différents, donc, pour ces enfants qui ont bénéficié d'une toute nouvelle technique interdite pratiquement partout dans le monde : le don de mitochondries. Seuls le Royaume-Uni depuis 2015 et l'Australie depuis 2022 l'ont autorisée. Les mères de ces enfants étant porteuses d'une pathologie génétique, cette technique a eu pour but d'éviter que leurs progénitures n'héritent du syndrome et ne développent une maladie mitochondriale *(lire l'encadré p. 70)*. Graves, souvent mortelles, les pathologies mitochondriales sont un ensemble de maladies génétiques. En France, on estime qu'il y a 200 nouveaux cas par an et que l'incidence frappe un nouveau-né sur 5000.

Dans quasiment toutes les cellules de notre corps résident des mitochondries. Ce sont de petits organites présents dans le cytoplasme, à proximité du noyau. Sans eux, une cellule ne saurait survivre puisque l'énergie dont elle a besoin pour assurer son fonctionnement — pulser si c'est une cellule cardiaque, s'étirer si c'est une cellule musculaire, transmettre un influx nerveux dans le cas du neurone, etc. — lui est fournie par des mitochondries. Ces minicentrales énergétiques fabriquent du carburant cellulaire, l'ATP (pour adénosine triphosphate), à partir de l'oxygène que nous respirons et des aliments que nous consommons.

Leur nombre et leur taille varient énormément selon l'organe. On en dénombre environ 2000 dans une cellule du foie ou une cellule musculaire, tandis qu'une cellule cardiaque en compte deux fois plus. Seuls les globules rouges en sont dénués. En réalité, et c'est logique, le nombre de mitochondries dans une cellule est proportionnel à la consommation énergétique de la cellule. Plus celle-ci est gourmande en énergie, plus elle aura besoin d'une forte concentration de ces minicentrales. Ce qui explique que les cellules musculaires, hépatiques, cardiaques et neuronales soient les plus richement dotées.

Particularité supplémentaire : une mitochondrie possède son propre génome, l'ADN mitochondrial (ADNmt), qui diffère de celui présent dans le noyau des cellules. En outre, seul l'ADNmt maternel est transmis et se retrouve dans l'ovocyte fécondé. C'est ce qui lui vaut d'être particulièrement utile en génétique des populations, car il permet de remonter des lignées féminines et d'établir

Si une fraction des mitochondries est défectueuse, c'est toute la chaîne de production énergétique qui se trouve affectée, avec de graves conséquences sur les organes du futur nourrisson



Les noyaux de la femme porteuse de mitochondries défectueuses ont été transférés dans l'ovocyte de la donneuse. Un ovule fécondé, contenant à la fois les chromosomes des parents et les mitochondries saines de la donneuse, a ainsi été obtenu.

notamment des généalogies. Un ovocyte humain en pleine maturité peut compter plus de 100 000 mitochondries, signalant par là son extraordinaire besoin énergétique. Et, justement, si une fraction de ces mitochondries est défectueuse, c'est toute la chaîne de production énergétique qui se trouve affectée, avec des conséquences plus ou moins importantes sur les organes du futur nourrisson en fonction de la quantité de mitochondries déficientes.

L'unique recours en dehors du don d'ovocytes

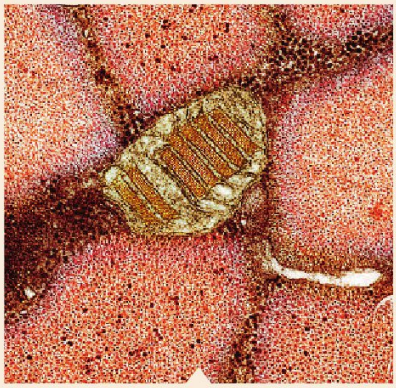
« Lorsqu'une femme a en elle les deux populations de mitochondries, à la fois pathologique et "normale", on parle d'hétéroplasmie, explique la professeure Julie Steffann, spécialiste des maladies mitochondriales à l'hôpital Necker-Enfants malades, à Paris. *Elle pourra transmettre des ovocytes qui n'ont pas de défaut et d'autres qui sont quasiment tous porteurs d'une mutation pathologique. Dans son cas, on utilisera la technique du diagnostic préimplantatoire (DPI), qui consiste en l'analyse génétique d'embryons issus d'une fécondation* in vitro *au troisième jour de leur développement. L'objectif étant de sélectionner parmi les embryons de la patiente ceux n'ayant quasiment pas de mitochondries défectueuses pour les réimplanter et conduire sainement la grossesse.* » Malheureusement, certaines patientes n'ont quasiment que de l'ADNmt muté, qui conduira à coup sûr à des enfants développant à un moment ou à un autre de leur existence une maladie mitochondriale. C'est pour ces femmes que le don de mitochondries a été développé et c'est l'unique recours, en dehors du don d'ovocyte, pour avoir un enfant en bonne santé.

Après fécondation avec le sperme du partenaire, les noyaux des ovules des patientes sont transférés dans d'autres ovules fécondés d'une donneuse dont on a retiré les noyaux mais laissé les mitochondries *(voir l'infographie ci-contre)*. Ce qui aboutit à des embryons contenant l'ADN nucléaire des deux

MALADIES MITOCHONDRIALES

Une kyrielle de syndromes

Toutes les maladies mitochondriales ont une même cause : un dysfonctionnement de la production d'énergie à l'intérieur des cellules. Résultat : les organes fonctionnent au ralenti et de moins en moins bien avec le temps. Les symptômes sont extrêmement variés et touchent généralement plusieurs organes ou tissus. Logiquement, ce sont les plus gourmands en énergie qui se trouvent les plus affectés, à savoir les muscles, le cerveau, le cœur et le foie. Plus le taux de mitochondries défectueuses est important au sein des cellules, plus les symptômes seront graves et se déclareront tôt. Parmi les organes les plus fréquemment touchés se trouvent l'ouïe et l'œil. Par exemple, l'une des maladies les plus courantes est la neuropathie optique héréditaire de Leber. Mais un même patient peut au cours de son existence enchaîner plusieurs syndromes. *« Les maladies mitochondriales sont des maladies évolutives,* décrit la généticienne Julie Steffann, de l'hôpital Necker-Enfants malades, à Paris. *Vous allez bien, puis une poussée se déclenche et vous fait perdre des acquis. D'abord la marche, par exemple, puis la vue, puis l'ouïe. Souvent, il arrive que vous récupériez en partie un des sens parce qu'il y a un phénomène de compensation des cellules. Malheureusement, un autre incident va survenir, vous faisant perdre autre chose, etc.* » Aucun traitement n'existe et le pronostic vital se trouve presque toujours engagé, particulièrement dans les formes précoces. *« Un de mes patients a 12 ans,* poursuit la spécialiste. *Il a déjà fait un premier AVC. Très brillant à l'école, il a commencé à développer une myopathie et ne peut plus faire de sport. Et de toute façon, nous sommes contraints de l'empêcher d'en faire parce que toute surconsommation énergétique peut favoriser la survenue d'un nouvel AVC.* »



UT MEDICAL SCHOOL/SPL/SUCRE SALÉ

Inclusions cristallines dans des mitochondries (vues au microscope), caractéristiques d'une myopathie.

parents plus l'ADN mitochondrial de la donneuse.

Pour l'étude menée à Newcastle, sur les 22 femmes participantes, huit ont donné naissance à des bébés. Les nouveau-nés sont tous en bonne santé. Il demeure encore dans leurs cellules quelques traces de mitochondries défectueuses, car — ce sont les aléas d'une technique de précision délicate et exigeante — il n'est pas rare, lorsqu'un noyau est prélevé chez une patiente, que quelques mitochondries situées à proximité soient également aspirées et transférées. Toutefois, pour six d'entre eux, la présence d'ADNmt pathogène est aujourd'hui quasiment indétectable. Seuls deux ont des taux de l'ordre de 15 %.

Néanmoins, en dépit de ce succès, tous les enfants seront soumis à un suivi rigoureux jusqu'à l'âge de 5 ans. En effet, des travaux précédents effectués sur des lignées de cellules souches embryonnaires ont montré qu'il pouvait se produire un phénomène de réversion, au cours duquel les ADNmt pathogènes prenaient peu à peu le dessus sur les ADNmt sains et devenaient majoritaires au sein des cellules. *« On en ignore la raison,* reconnaît Julie Steffann. *Certains spécialistes pensent qu'il pourrait y avoir des avantages sélectifs de l'ADNmt muté qui expliqueraient qu'il devienne au fil du temps prépondérant et prenne l'ascendant sur l'ADNmt sain.* »

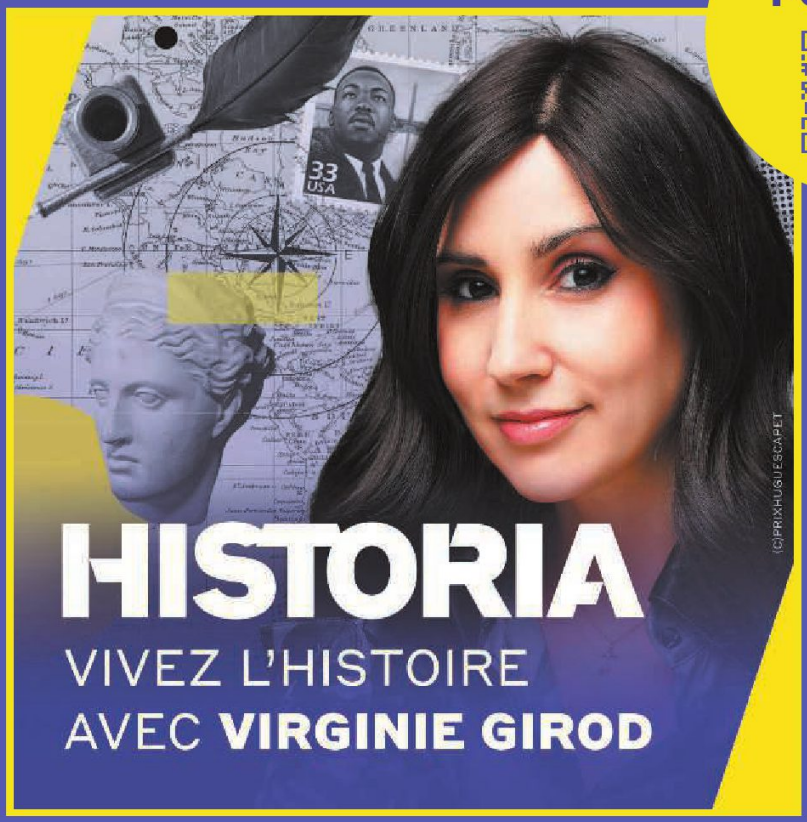
Des associations peut-être incompatibles à long terme

Et quid des effets sur le long terme d'une telle manipulation génétique ? Il est bien trop tôt pour répondre à cette question. Des travaux menés sur des souris ont montré que certaines ne supportaient pas très bien l'apport de mitochondries étrangères. Car, pour produire de l'énergie dans la cellule, il est nécessaire que se mette en place une coopération entre les protéines du noyau et celles venant des mitochondries pour édifier les super-complexes de la chaîne respiratoire cellulaire. Peut-être certaines associations sont-elles incompatibles sur le long terme.

Pour l'instant, de tels travaux ne sont pas réalisables en France. Contrairement au Royaume-Uni, notre pays a signé en 1997 la convention internationale européenne d'Oviedo, qui établit les principes fondamentaux de protection des droits de l'être humain à l'égard des applications de la biologie et de la biomédecine, et pour lequel toute modification des cellules germinales est proscrite. *« Pour que cette technique de médecine reproductive soit permise, il faudrait avant tout modifier la convention avant d'essayer de l'autoriser chez nous,* estime Julie Steffann. *Il faudrait un lobby important et massif de patients mais leur nombre est limité car ce sont, heureusement, des maladies rares qui concernent peu de gens.* » ■ **Hervé Ratel**

Historia, un magazine qui se fait entendre.

NOUVEAU PODCAST



Nouveau podcast disponible sur :

JACQUES DAYAN
PÉDOPSYCHIATRE

« Un traumatisme collectif d'un genre inédit »

Il y a dix ans, Paris connaissait des attentats parmi les plus meurtriers perpétrés en Europe : 131 morts, 413 blessés physiques et près de 1300 blessés psychiques. Coresponsable du programme 13-Novembre, Jacques Dayan dresse un premier bilan de cette série d'études du trouble de stress post-traumatique (TSPT).

Quel est l'objectif du programme de recherche créé à la suite des attentats de 2015 ?
Le programme 13-Novembre a pour objectif de mieux comprendre les effets du traumatisme sur le cerveau, le langage et le comportement afin de mieux l'appréhender, au travers des thérapies par exemple. Comme ce champ de recherche est très large, le programme a été divisé en plusieurs études : 1000 s'intéresse aux témoignages des victimes ; Espa se consacre à la santé mentale et à la prise en charge ; Remember étudie les répercussions du traumatisme sur le fonctionnement du cerveau, les facteurs de résilience notamment ; quant à l'étude Care 13-11, dans laquelle j'interviens, elle explore la transmission du traumatisme. L'ensemble est conduit par des scientifiques de l'université Paris-I Panthéon Sorbonne, du CNRS et de l'Inserm, et plus d'un millier de personnes y participent. Les derniers résultats devraient être publiés d'ici à deux ans.

Quelles sont les particularités de ce traumatisme collectif ?
C'est très différent de vivre un traumatisme seul ou à plusieurs, et on en voit les particularités dans l'expérience post-traumatique. Après la Première Guerre mondiale, quand les soldats commençaient à raconter les tranchées en famille, l'entourage — même les plus proches — les faisait souvent taire, sous prétexte que le moment était festif. Ce refus d'entendre s'est répété avec les déportés de la Seconde Guerre mondiale, puis avec les traumatisés de la guerre d'Algérie. Comme si, pour aller mieux, la population avait besoin de passer à autre chose, impliquant de ne pas écouter les blessés. Le cas des attentats du 13-Novembre est un peu à part car, bien que n'engageant pas directement tout le pays mais seulement une partie de la population, il a eu les caractères d'un traumatisme collectif.

C'est-à-dire ?
Les attentats ont touché des personnes de tous âges, de toutes classes… Quand des dealers s'entretuent, on se rassure en se disant : *« Ça ne nous concerne pas. » Idem* lorsqu'il y a des meurtres de diplomates, de journalistes, ou de religieux, cela ne concerne pas la majorité des Français. En revanche, si c'est une population hétérogène, sans grande particularité, qui est touchée, à qui on peut s'identifier, comme des employés qui venaient écouter de la musique ou boire un verre en terrasse, comme tout le monde, la France entière s'est sentie impliquée. Les médias ont donné énormément de visibilité à l'événement. Les images ont tourné en boucle, des débats ont été organisés sur tous les plateaux… Cette visibilité a pu soutenir ou bien heurter les victimes. Elle a aidé les personnes en demande d'écoute, afin que leur parole soit reconnue. En revanche, pour celles qui étaient dans une phase d'évitement, cela a été très difficile.

Sur la totalité des participants aux études qui ont été exposés aux attentats, une moitié a développé un

ANTOINE DOYEN POUR SCIENCES ET AVENIR

Professeur de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent, Jacques Dayan intervient dans l'étude Care-13-11 du programme 13-Novembre qui explore la transmission du traumatisme.

Plus les symptômes physiques sont aigus durant l'événement traumatique, plus le risque de développer un trouble chronique est élevé

trouble de stress post-traumatique. Qu'est-ce qui fait que nous ne sommes pas tous égaux face à un traumatisme ?

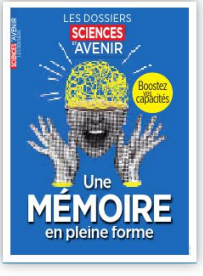
Quand on subit un traumatisme, différents mécanismes de défense spontanés se mettent en place, tels que l'hypervigilance, le refoulement, jusqu'à la dissociation dont on trouve parfois la trace dans le cerveau. S'ils persistent, ils deviennent pénalisants et peuvent conduire à des troubles très variés, comme des phobies ou des attaques de panique, mais le trouble le plus caractéristique est, au-delà de quatre semaines, le trouble de stress post-traumatique (TSPT).

La vulnérabilité à ce syndrome dépend de facteurs environnementaux liés au contexte du traumatisme en lui-même, mais aussi personnels. Des facteurs génétiques et biologiques, comme la taille de l'hippocampe, peuvent influer sur la capacité à affronter l'adversité : la résilience. On s'est aussi rendu compte que plus les symptômes physiques — comme l'accélération du rythme cardiaque ou les tremblements — étaient aigus durant l'événement traumatique, plus le risque de développer un trouble de stress post-traumatique chronique était élevé. Ce constat n'est pas nouveau, il date des années 1960, mais il a été démontré scientifiquement dans ce programme. Et puis, la résilience dépend également de nos expériences antérieures. Nous avons remarqué que les personnes qui avaient déjà subi un premier traumatisme étaient plus sujettes au trouble de stress post-traumatique et à l'anxiété pathologique. Pendant l'épidémie de Covid-19, par exemple, l'anxiété des personnes traumatisées par les attentats du 13-Novembre atteignait bien plus souvent un niveau pathologique que celle des participants non exposés.

Comment les enfants peuvent-ils être touchés par le vécu de leurs parents ?

Cette question est l'objet de l'étude Care 13-11. Pour l'instant, ce qui est observé est qu'il y a effectivement une transmission possible d'une génération à l'autre, non pas du syndrome de stress post-traumatique en lui-même, mais de symptômes. Le fait que des parents ne se remettent pas d'une dépression qui suit le traumatisme peut avoir un effet sur la famille, comme n'importe quelle dépression. Mais il peut aussi y avoir des choses plus spécifiques, comme des images, des peurs. Et les enfants peuvent être touchés par la présence, mais aussi par l'absence de comportements attendus : si les parents sont dans une phase d'évitement, qu'ils éteignent la télé quand les attentats sont évoqués par exemple, l'enfant peut à son tour, consciemment ou inconsciemment, éviter ou au contraire développer un intérêt poussé pour ce sujet. Mais cette transmission n'est pas systématique et, surtout, elle n'est pas seulement négative ! Les parents exposés peuvent aussi transmettre ce qui leur a permis de résister : des facteurs de résilience qui transparaissent dans leur façon d'appréhender la vie dont les enfants sont témoins et dont ils bénéficieront. ■

Propos recueillis par Marie Parra



Retrouvez d'autres articles sur la mémoire dans le dernier numéro des Dossiers de Sciences et Avenir.

Sous la protection des oméga-3

Ces acides gras sont présents dans les huiles, les œufs, certains poissons et viandes. Une consommation régulière permettra de bénéficier de leurs bienfaits.

Nécessaires au développement et au bon fonctionnement du corps humain, les oméga-3 sont une famille d'**acides gras polyinsaturés** qui se divise en trois types : ALA, DHA, EPA… Leur chef de file, l'acide alpha-linolénique (ALA), se transforme dans l'organisme en acide eicosapentaénoïque (EPA) et en acide docosahexaénoïque (DHA), mais en quantités insuffisantes pour couvrir nos besoins journaliers. Il faut donc se procurer ces trois acides gras polyinsaturés chaque jour à travers l'alimentation pour bénéficier de leurs bienfaits.

Où les trouver ?

L'ALA est présent uniquement dans les végétaux, particulièrement dans les huiles (colza, noix, lin, etc.) et le pourpier. 10 g de graines de lin en fournissent 1,7 g ; une cuillère à soupe (15 g) d'huile de colza, 1,1 g, soit la moitié des besoins quotidiens. On trouve aussi l'acide alpha-linolénique dans certains aliments (œufs, viande) portant le logo Bleu-Blanc-Cœur — une démarche agricole et alimentaire durable où les animaux reçoivent des fourrages et graines naturellement riches en oméga-3 (herbe, luzerne, lin). Les EPA et DHA se logent dans certains fruits de mer (moule, crevette, etc.), mais surtout dans les poissons gras (anchois, hareng, maquereau, etc.). 100 g de sardines à l'huile couvrent ainsi largement les besoins quotidiens avec 670 mg d'EPA et 1 g de DHA (1).

2 g
d'ALA
sont recommandés par jour ainsi que 250 mg d'EPA et 250 mg de DHA pour la population générale.
(SOURCE : ANSES.)

Ils protègent la rétine

Le DHA représente 50 % des acides gras présents au sein des membranes des cellules de la rétine. Les oméga-3 participent aussi au renouvellement des disques des photorécepteurs, des cellules spécialisées dans la réception de la lumière. Des

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

ACIDES GRAS POLYINSATURÉS Acides gras ayant plusieurs doubles liaisons dans leur chaîne carbonée, parmi lesquels les oméga-3 (ALA, EPA et DHA) et oméga-6 sont dits essentiels.

DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) Maladie chronique qui atteint le centre de la rétine (macula) et entraîne une perte progressive de la vision.

OMÉGA-6 Acide linoléique converti dans l'organisme en acide arachidonique. On les trouve dans les produits animaux (viande, œufs, produits laitiers), les fruits à coque et les huiles (tournesol, pépins de raisin).

taux élevés plasmatiques seraient associés à une réduction de 40 % du risque de dégénérescence maculaire liée à l'âge (**DMLA**) (2). Les oméga-3 limiteraient en effet la mort cellulaire et le développement vasculaire dans la rétine, des mécanismes cellulaires et moléculaires impliqués dans l'apparition de la maladie.

Ils entretiennent les fonctions cérébrales

Les oméga-3 entrent dans la composition de la membrane des neurones et la rendent plus fluide, ce qui facilite la communication entre les cellules neuronales et participe, de fait, au bon fonctionnement du cerveau. Des travaux ont montré qu'une consommation maternelle insuffisante en oméga-3 altérerait le développement neuro-cérébral de l'enfant, entraînant des déficits cognitifs (langage, mémoire, apprentissage, etc.) (3). Les oméga-3 possèdent également des propriétés anti-inflammatoires qui aident à contrer les effets de l'âge et le déclin cognitif. Des travaux américains menés sur 1490 personnes âgées de plus de 65 ans suggèrent que plus le taux sanguin d'oméga-3 est élevé, plus le risque de développer la maladie d'Alzheimer diminue, en particulier chez les porteurs du gène ApoE4, connu pour majorer le risque de la maladie neurodégénérative (4). Par ailleurs, les oméga-3 amélioreraient les symptômes de la dépression, notamment lorsqu'une supplémentation en EPA est associée à un traitement antidépresseur (5).

Un effet protecteur pour des patients à risque cardio-vasculaire

Selon le type d'oméga (DHA seul ou couplé à l'EPA) et les doses administrées, les études ont montré des résultats variables, voire contradictoires, quant à leurs réels avantages sur la survenue d'accidents cardio-vasculaires et la mortalité, autant en prévention dite primaire (chez les personnes sans aucun risque cardio-vasculaire) que secondaire (chez celles à risque). Seule l'administration d'EPA en monothérapie semble finalement montrer des effets bénéfiques. Selon les résultats de l'essai Reduce-It, la prise d'une forte dose (4 g/jour) d'EPA purifié chez les patients à haut risque cardiaque (diabétiques, antécédents d'infarctus du myocarde ou d'AVC, etc.) réduirait de 25 % le risque d'événements cardio-vasculaires graves ou fatals après cinq ans de suivi (6). Ces effets protecteurs de l'EPA à haute dose ont été confirmés par une méta-analyse portant sur plus de 149 000 individus (7).

Pas trop d'oméga-6

Si un bon apport en oméga-3 est bénéfique pour la santé, l'équilibre avec les acides gras polyinsaturés de type **oméga-6** est nécessaire. Ces deux lipides entrent en effet en compétition dans l'organisme en partageant les mêmes enzymes pour leur métabolisme. Une consommation plus élevée en oméga-6 peut aussi favoriser un état inflammatoire. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) recommande à cet égard un ratio oméga-6/oméga-3 de cinq pour un, alors qu'avec une alimentation moderne, il s'approche le plus souvent de dix pour un. ■ **Sylvie Boistard**

JEAN-FRANÇOIS RENUCCI Médecin vasculaire au CHU de la Timone (Marseille)

L'EPA, un allié contre les maladies cardio-vasculaires

« Des études montrent que l'acide eicosapentaénoïque (EPA) diminue le taux de triglycérides sanguins. Mais, surtout, il contribue à réduire l'inflammation au niveau de la paroi du vaisseau (endothélium), ce qui pourrait avoir un effet vasodilatateur et stabiliserait les plaques d'athérome. L'EPA, de par ses propriétés anti-agrégantes, augmenterait aussi la fluidité du sang, limitant ainsi le risque de formation de caillots. Toutefois, pour obtenir des effets favorables sur la santé cardio-vasculaire, les études recommandent une prise quotidienne de 4 g, que seule une supplémentation pourrait apporter. Or, étant aujourd'hui non remboursée, elle n'est pas prescrite en prévention des maladies cardio-vasculaires. »

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) High concentrations of plasma n3 fatty acids are associated with decreased risk for late age-related macular degeneration, Merle BM. et al., *J Nutr. 2013.*

(3) Essential omega-3 fatty acids tune microglial phagocytosis of synaptic elements in the mouse developing brain, Madore C. et al., *Nature Communications, 2020.*

(4) Red Blood Cell DHA Is Inversely Associated with Risk of Incident Alzheimer's Disease and All-Cause Dementia, Sala-Vila A. et al, *Nutrients, 2022.*

(5) Meta-analysis and meta-regression of omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation for major depressive disorder, Mocking R. et al., *Translational Psychiatry*, 2016.

(6) Cardiovascular Risk Reduction with Icosapent Ethyl for Hypertriglyceridemia, Bhatt DL et al., *NEJM*, 2018.

(7) Effect of omega-3 fatty acids on cardiovascular outcomes, Khana S. et al, *eClinical Medicine*, 2021.

PATRICK LANDMANN / SPL / SUCRE SALÉ

Maints trésors attendent encore d'être découverts (ici, une tête romaine de Mars extraite du Rhône en 2009 près d'Arles). Mais les fouilles ne suivent pas toutes la voie légale : le marché illicite des antiquités est estimé entre 3,1 et 5,7 milliards d'euros par an dans le monde.

La France au cœur d'un trafic d'antiquités

Chaque année, des milliers d'objets d'intérêt archéologique sont extraits illégalement des sous-sols ou des fonds marins et fluviaux français. Afin de lutter contre ce pillage du patrimoine et le trafic qu'il génère, les pouvoirs publics développent des outils pour tracer des objets découverts et surveiller des sites remarquables.

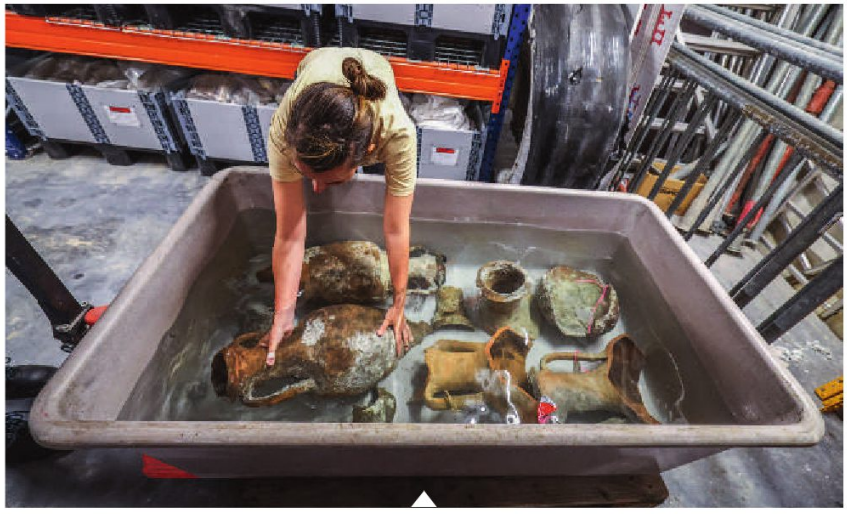
Par Joël Ignasse

L'homme au masque de fer y aurait séjourné entre 1687 et 1698. Le fort royal, établi sur la plus grande des deux îles de Lérins (au large de Cannes), a donné son nom à l'épave découverte en 2017, *Fort Royal 1*. Cette embarcation antique (datée du IIe siècle avant notre ère) repose à une trentaine de mètres de profondeur. À son bord, une cargaison d'amphores à vin gréco-italiques, répartie sur deux niveaux, constitue un véritable trésor archéologique. Mais dès 2022, à l'occasion des premières fouilles scientifiques, les équipes du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (Drassm) du ministère de la Culture constatent que l'épave a été explorée, dégradée et pillée. *« Il y a une illusion de profondeur dans la mer : il est faux de croire que ces découvertes sont protégées, les objets sont à portée de main »*, déplore Frédéric Leroy, conservateur du patrimoine et directeur adjoint du Drassm. Quelques semaines plus tard, lors d'une perquisition dans un garage du Var, les gendarmes saisissent une soixantaine d'amphores entières accompagnées de 64 cols et d'objets romains, vraisemblablement issus de ce pillage. Le type de butin qu'on pourrait trouver *« en vente sur eBay, encore couvert de concrétions marines »*, confie-t-il.

2,4 millions
d'objets d'intérêt archéologique exhumés illégalement chaque année en France
(SOURCE : ASSOCIATION HAPPAH)

Au-delà de cette affaire spectaculaire, des dizaines d'autres cas sont recensés. En mai dernier, l'opération internationale Pandora IX, menée par Interpol, Europol et l'Organisation mondiale des douanes (OMD), a permis la saisie de plus de 37 000 objets culturels et l'interpellation de 80 personnes dans 23 pays. Cette action coordonnée, à laquelle la France a participé, illustre l'ampleur mondiale du trafic d'antiquités et ▸

GGMARMEDI



GGMARMEDI/SYSPEO/SIPA

Une soixantaine d'amphores antiques, pillées dans l'épave « Fort Royal 1 » au large des îles de Lérins, ont été saisies en 2022 lors d'une perquisition dans un garage du Var (en haut). Elles ont été prises en charge par le service d'Archéologie Nice Côte d'Azur (en bas).

la nécessité d'une coopération policière renforcée. L'Office des Nations unies contre la drogue et le crime estime le marché illicite des antiquités entre 3,1 et 5,7 milliards d'euros par an ; un trafic que les analystes placent au troisième rang des criminalités lucratives, derrière la drogue et les armes.

Une concentration d'épaves en Méditerranée et dans le Rhône

En France, de nombreux objets provenant de la Méditerranée alimentent ce trafic. Il faut dire que l'humain navigue sur cette mer depuis plus de 7000 ans ! Et nombreux sont les navires qui y ont chaviré à cause des conditions climatiques ou à l'occasion de conflits : phéniciens, romains, byzantins, marchands… tous ont laissé des traces. Rien qu'au large de Marseille, les spécialistes ont identifié près de 250 embarcations coulées. Cette concentration d'épaves s'observe aussi en remontant le cours du Rhône, du port fluviomaritime d'Arles à Lyon. Chaque année, les archéologues repèrent de nouveaux sites, fragiles et parfois déjà endommagés. *« On a longtemps cru que le Rhône avait tout emporté, mais c'est exactement l'inverse : il conserve. Il ensevelit, il sédimente, il protège »*, souligne Claude Sintès, ancien directeur du musée départemental Arles antique, spécialiste d'histoire maritime. Effectivement, sous les eaux opaques du Rhône dorment des dizaines de navires, dont une trentaine sont déjà catalogués. C'est une mémoire engloutie que les archéologues tentent de réveiller depuis une trentaine d'années, avec patience et précaution.

La navigation fluviale était l'artère vitale de la Gaule romaine, permettant d'acheminer depuis la mer et vers le nord vin, huile, céramique, métal, animaux, tissus… Les bateaux, à fond plat, tirés parfois à la corde depuis la rive, longeaient les méandres du fleuve au rythme lent des bœufs, des esclaves ou du vent. Les épaves que l'on découvre aujourd'hui sont souvent celles de navires de commerce, échoués lors de crues ou sabordés volontairement en fin de carrière. À Arles, les grandes fouilles menées depuis les années 2000 ont permis la mise au jour de plusieurs embarcations parfaitement conservées. La plus célèbre, *Arles-Rhône 3*, un chaland long de 31 mètres, a été exhumé en 2011 dans des conditions exceptionnelles. Grâce à l'envasement rapide du fond du fleuve, la structure en bois avait été protégée de l'oxygène et des xylophages. Ce trésor a été remonté pièce par pièce, consolidé, et reconstitué au musée départemental Arles antique, où il est aujourd'hui exposé.

« C'est un témoignage extraordinaire de la logistique fluviale romaine, souligne Claude Sintès, qui a lancé ces fouilles. *On voit comment les planches ont été ajustées, comment la proue était renforcée, où se trouvait la cargaison. C'est toute une organisation commerciale qui renaît sous nos yeux.* » Les objets découverts à bord (vaisselle, chaussures, outils, cordages) révèlent aussi les conditions de vie des bateliers, leurs itinéraires, leurs repas. Cette fois, les scientifiques ont eu de la chance et ont pu récupérer la cargaison complète. Mais ce n'est souvent pas le cas. Ainsi, l'épave *Arles-Rhône 2* (découverte dans les années 1990) a fait l'objet de plusieurs pillages, et certains voleurs ont même été pris la main dans le sac par la brigade fluviale de la gendarmerie.

Des pilleurs qui lisent les revues et suivent les colloques

De même, une autre barge romaine, datée du IVe siècle, contenant des centaines de monnaies romaines en métal précieux dont de l'or, a suscité bien des convoitises. Découverte en 2018, sa cargaison a été largement médiatisée à la suite de la diffusion d'un documentaire en 2021 sur une chaîne publique. L'entrepôt contenant certains objets remontés à la surface (mais pas les précieuses monnaies) a été cambriolé et l'épave sans doute visitée. *« Les pilleurs sont très au fait des découvertes. Ils lisent les revues, suivent les colloques, et se rendent sur place parfois avant les archéologues »*, confirme

FRANCE LAINÉ

ENTRETIEN

THIERRY TORTOSA
CONSERVATEUR DE LA RÉSERVE NATURELLE DE LA SAINTE-VICTOIRE, AGENT COMMISSIONNÉ ET ASSERMENTÉ CHARGÉ DE FONCTIONS DE POLICE JUDICIAIRE AU TITRE DU CODE L'ENVIRONNEMENT

Les fossiles attirent aussi les trafiquants

On parle beaucoup du pillage archéologique, mais le trafic de fossiles est-il aussi préoccupant en France ? Peut-on quantifier ce phénomène et identifier les zones les plus touchées ?
Le pillage paléontologique est tout aussi préoccupant que celui de l'archéologie, à la différence qu'il n'existe pas de réglementation claire pour les fossiles, sauf sur les territoires protégés par décret ou arrêtés préfectoraux. Il est très difficile de quantifier le nombre de découvertes, et surtout la part de fossiles scientifiquement intéressants qui ne seront jamais connus des chercheurs. Deux éléments sont importants : les zones faisant l'objet de recherches systématiques sont encore très loin d'avoir révélé toutes leurs richesses (et sont particulièrement exposées au pillage), et une très grande partie des découvertes connues est le fruit du travail d'amateurs.

La valeur scientifique d'un fossile tient autant à sa nature qu'à son contexte. Pouvez-vous nous expliquer ce que la science perd quand un spécimen est extrait illégalement ?
Privé de son contexte géologique et spatial, un fossile perd l'essentiel de sa valeur scientifique. Il ne peut plus être daté ni relié à son paléoenvironnement d'origine. C'est un objet vide de sens, parfois endommagé par une extraction non maîtrisée. Pire, le site lui-même peut être dégradé, compromettant d'éventuelles découvertes futures. Une fouille illégale peut aussi entraîner la réappropriation du fossile par son propriétaire légitime, le rendant alors inaccessible à la recherche scientifique.

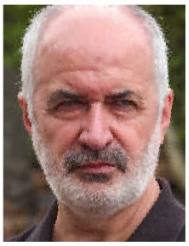
Existe-t-il aujourd'hui des moyens concrets pour lutter contre le trafic de fossiles ? Entre législation, sensibilisation des collectionneurs et traçabilité, que faudrait-il renforcer pour mieux protéger ce patrimoine ?
Les leviers courants sont la protection juridique (code civil, code de l'environnement), permettant de préserver un site ou une propriété privée. L'outil le plus efficace reste la sensibilisation du public, à travers l'accompagnement à la recherche, à l'extraction de fossiles et à la conservation des collections. La lutte contre les circuits commerciaux illégaux est quasi inexistante en France. Il faudrait interdire l'exportation du patrimoine paléontologique, comme le font de nombreux pays. Le problème du commerce est double : la nature des fossiles recherchés, souvent dictée par des effets de mode, et la spéculation liée à la demande. Les fossiles vendus, parfois remarquables, deviennent inaccessibles pour les institutions chargées de la conservation de ce patrimoine. À l'inverse, on observe de plus en plus de squelettes de dinosaures relativement communs, mais présentant néanmoins un intérêt scientifique, être achetés pour plusieurs millions d'euros lors de ventes aux enchères. ■

Propos recueillis par J. I.

DGDDI

Ces spécimens font partie des 67 biens paléontologiques interceptés par la douane fin 2024 dans une voiture conduite par deux retraités sur la RN 83 en direction de Strasbourg.

Frédéric Leroy. Les moyens humains sont insuffisants pour mettre en œuvre des technologies modernes, comme des drones subaquatiques ou des sonars de haute résolution afin de surveiller ces sites remarquables. C'est pourquoi une part du travail consiste, pour certains gisements, à garder le secret, au moins le temps de sécuriser les sites les plus sensibles.


AFP

« Ce que nous perdons avec le pillage, c'est l'intelligibilité du passé, pas seulement des objets »

Dominique Garcia, président de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap)

Le « détectorisme », un phénomène de société

Ces exemples démontrent qu'en France, le pillage archéologique n'est pas un phénomène marginal. Chaque année, environ 2,4 millions d'objets d'intérêt archéologique sont exhumés illégalement, d'après les estimations de l'association Happah (Halte au pillage du patrimoine archéologique et historique). *« Ce chiffre peut sembler énorme, mais il est étayé par une compilation de rapports, de déclarations volontaires, d'observations de terrain. Le phénomène est massif, mais peu visible. Les réseaux sociaux et les plateformes de vente en ligne sont aujourd'hui les circuits les plus actifs pour l'écoulement des objets pillés »*, précise le maréchal des logis-chef Alexandre Dumont-Castells, docteur en archéologie et conseiller pour la sauvegarde du patrimoine archéologique de la région de défense Sud de la gendarmerie nationale. Si les pillages sous-marins sont les plus médiatisés, la majorité des objets de contrebande sont extirpés du sol et dénichés grâce à des détecteurs de métaux, maniés par les quelque 100 000 membres de la communauté des « détectoristes ». La pratique en soi n'est pas illégale, mais strictement encadrée. Tout usage du détecteur à des fins de recherche d'objets anciens nécessite une double autorisation : celle du propriétaire du terrain et celle de l'État. Et il est interdit de prospecter sur des sites archéologiques protégés. *« Mais le détectorisme est aujourd'hui un fait de société, toléré dans l'espace public alors qu'il constitue bien souvent un délit »*, souligne Xavier Delestre, ancien conservateur régional de l'archéologie de Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le droit français n'a pris que tardivement la mesure du problème : *« Il est urgent de consolider l'arsenal législatif en matière de traçabilité du détecteur de métaux qui devrait être soumis à une réglementation, pour le catégoriser comme une arme à la fois pour la détention et la vente — même entre particuliers — et enfin que la loi prévoie la création d'un fichier national (déclaratif obligatoire) des moyens de détection de métaux »*, insiste Alexandre Dumont-Castells. Car certaines régions sont aujourd'hui transformées en véritables « gruyères archéologiques ». Et les pilleurs ne ressemblent plus à ceux des années 1950. *« Leur profil est bien plus varié qu'on ne le pense : on y trouve des passionnés d'histoire, des revendeurs opportunistes, et aussi des gens parfaitement insérés socialement. Parmi eux, trois profils d'archéopilleurs ressortent. L'amasseur compulsif recherche et accumule indistinctement le fruit de ses découvertes. Le collectionneur qui, dès lors qu'il se spécialise dans une période historique, une typologie de mobiliers, commence à échanger, voire acheter ou vendre : il verse alors dans le trafic. Et le trafiquant, qui peut être soit un collectionneur, soit un individu totalement désintéressé de l'archéologie et qui a flairé l'opportunité de tirer des bénéfices de ce trafic d'objets anciens »*, précise-t-il.

De nouveaux outils pour améliorer la traçabilité

« Je ne comprends pas ces interdictions, on fouille dans des champs où personne n'ira jamais chercher et je serai ravi de voir mes découvertes exposées si cela était autorisé », rétorque un amateur de ces sorties prospectives. En effet, dans l'esprit du grand public, un objet archéologique conserve sa valeur, même lorsqu'il est extrait sans autorisation. Pourtant, pour les scientifiques, la valeur d'un objet est d'abord patrimoniale et le contexte de la découverte est essentiel. *« Ce que nous perdons avec le pillage, c'est l'intelligibilité du passé, pas seulement des objets »*,

RÉGLEMENTATION

Ce que dit la loi

PATRIMOINE CULTUREL PROTÉGÉ Tout bien présentant un intérêt historique, artistique, archéologique, scientifique ou technique entre dans le champ du patrimoine (article L.1 du code du patrimoine).

ENJEU NATIONAL La préservation de ce patrimoine fait partie des intérêts fondamentaux de la nation, au même titre que la sécurité ou la défense (article 410-1 du code pénal).

DÉCOUVERTES FORTUITES Tout objet archéologique trouvé par hasard doit être déclaré à la mairie ou à la Drac (article L.542-1 du code du patrimoine).

DÉTECTEURS DE MÉTAUX Leur usage est soumis à autorisation préalable (article L.531-14 du code du patrimoine).

VOL OU DESTRUCTION Ces délits sont punis de sept ans de prison et 100 000 euros d'amende (article 322-3-1 du code pénal).

JEROME CHATIN/EXPANSION-REA

Pour traquer les trafics sur le Web, l'Office central de lutte contre le trafic des biens culturels utilise la base de données Treima, qui recense les objets d'art volés en France.

rappelle Dominique Garcia, président de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). *« J'ai vu des contextes gallo-romains perdre tout intérêt patrimonial en quelques heures à cause de prospections illégales. L'archéologie préventive est une alternative efficace aux destructions sauvages, mais elle n'a pas les moyens d'être partout »*, concède-t-il.
Depuis quelques années, une prise de conscience institutionnelle émerge. Un réseau de référents patrimoine se met en place dans la gendarmerie qui complète les activités des douanes. Sur l'initiative de Xavier Delestre, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur fait office de modèle dans cette lutte : depuis 2015, 120 perquisitions ont eu lieu et quelque 120 000 objets ont été saisis, le tout pour une valeur marchande de plusieurs millions d'euros. *« La formation des gendarmes progresse »*, ajoute Alexandre Dumont-Castells. Un progrès que confirme Frédéric Leroy : *« Le Drassm a développé des partenariats avec la gendarmerie maritime, mais cela reste sous-dimensionné. »* Les procureurs comme les tribunaux commencent également à suivre : des peines de prison fermes et des amendes à six chiffres ont été prononcées en 2024, notamment dans l'Hérault.
Pour les forces de l'ordre, l'enjeu est de stopper le pillage mais de mettre fin aussi aux trafics, que ces derniers se fassent de manière occasionnelle (foires, enchères) ou organisée (sites de revente).
« L'idée, c'est d'agir en amont. Intercepter les objets avant qu'ils ne disparaissent dans des filières étrangères, voire dans des collections privées », résume le gendarme. Des outils sont également en développement pour améliorer la traçabilité, à l'image de bases de données intégrées ou de puces invisibles apposées sur certains artefacts fragiles. Une piste suscite particulièrement l'intérêt : la traçabilité génétique avec le tagging-ADN. Il s'agit de marquer les objets découverts avec de l'ADN synthétique en en projetant sur tout ou une partie de leur surface afin de pouvoir les suivre en cas de vol. Sur certaines amphores, on peut encore prélever des microfragments de vin ou d'huile, qui permettent d'identifier l'origine géographique. À terme, ce type d'analyse pourrait servir à authentifier un lot saisi, voire à remonter jusqu'à un site de pillage. L'Inrap et plusieurs laboratoires universitaires mènent actuellement des expérimentations en ce sens.

La majorité des objets de contrebande sont dénichés grâce à des détecteurs de métaux : ces monnaies gauloises proviennent de la collection d'un détectoriste.

FRANCE LAINÉ

Un site de signalement anonyme depuis 2023

Autre levier d'action : la participation citoyenne. En 2023, le ministère de la Culture a lancé un site de signalement anonyme, permettant de remonter des informations sur des objets douteux observés en ligne ou en brocante. Les résultats sont encore timides (84 signalements validés en un an), mais les services d'enquête y voient un outil prometteur. En parallèle, des campagnes de communication ciblent les collectionneurs, les passionnés de patrimoine, les brocanteurs. Objectif : rappeler que l'acquisition d'un objet ancien ne se fait jamais sans origine ni précaution.
En Europe, les initiatives se multiplient. Le Royaume-Uni a mis en place dès 1996 le Portable Antiquities Scheme (PAS), qui incite les prospecteurs à déclarer leurs découvertes spontanément. Un million d'objets ont ainsi été inventoriés. Le système repose sur une collaboration étroite entre services publics et citoyens. Néanmoins certains archéologues redoutent une forme de « légalisation du pillage », tandis que d'autres craignent que le sous-sol britannique se retrouve rapidement nettoyé de ses trésors et que des ressources archéologiques soient condamnées à terme. Mais tous s'accordent sur un point : sans éducation, sans pédagogie, sans prise de conscience collective, les lois resteront inefficaces et une partie du patrimoine continuera à alimenter le trafic international. ■

Dès le Moyen Âge, le suaire de Turin n'était pas considéré comme une relique

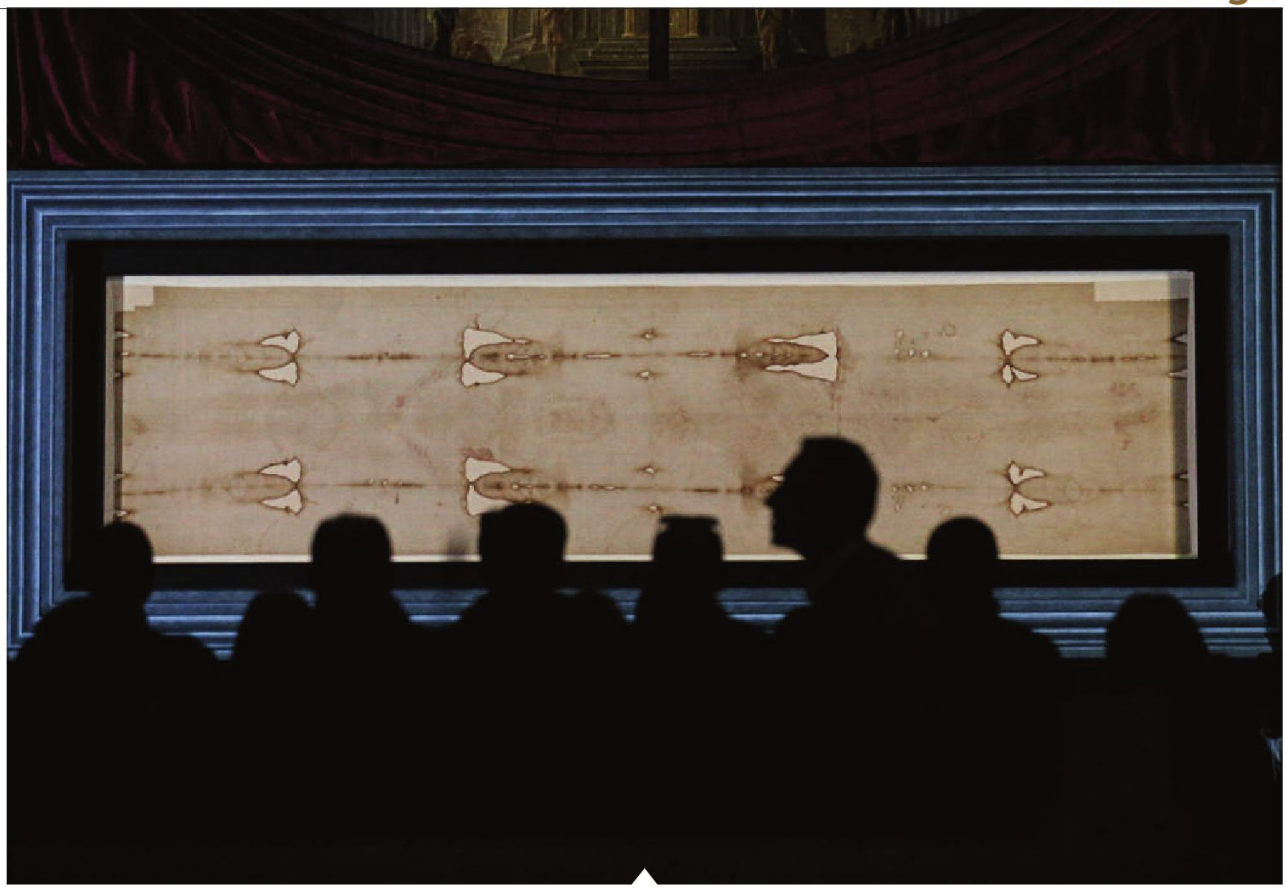
Une nouvelle étude montre qu'au XIVe siècle, la pièce de lin était considérée par les autorités ecclésiastiques comme une simple représentation du linceul du Christ. Sa datation au carbone 14 avait établi dès les années 1980 qu'elle avait été fabriquée au Moyen Âge.

C'est le morceau de tissu le plus célèbre au monde, et incontestablement celui qui a fait le plus couler d'encre depuis son apparition dans une église de Champagne en 1354. Le suaire de Turin, appelé également « saint suaire » par de nombreux catholiques, porte l'image pâle, comme imprimée à sa surface, d'un homme nu. Pour certains croyants qui le vénèrent depuis près de six siècles, il s'agirait du linceul sur lequel l'empreinte du corps du Christ a été figée après sa crucifixion. Plusieurs analyses au carbone 14 réalisées dans les années 1980 ont néanmoins démontré que le tissu n'était pas contemporain de Jésus : la pièce de lin a été fabriquée au Moyen Âge, entre la fin du XIIIe siècle et le XIVe siècle.

Le 28 août, une étude publiée par l'historien français Nicolas Sarzeaud dans la revue *Journal of Medieval History* (relayée par le magazine *La Vie*) est venue éclairer d'un jour nouveau une partie cruciale de l'histoire du linceul. Jusqu'ici, la plus ancienne critique formelle écrite sur le suaire venait de Pierre d'Arcis, évêque de Troyes — une lettre de 1389 dans laquelle il dénonçait le caractère frauduleux de la « relique ». Mais une source plus ancienne, datée d'avant 1370 et redécouverte par les médiévistes Alain Boureau et Béatrice Delaurenti, vient reculer dans le temps le rejet du tissu par l'Église elle-même. Il faut d'abord rappeler que dans l'une des lettres de 1389, le pape avignonnais Clément VII rapporte qu'un seigneur local du nom de Geoffroy II de Charny a demandé l'autorisation d'exposer une *« figure ou représentation du Suaire de notre Seigneur Jésus-Christ »*. *« Il parle de "*figura sive representatio sudarii*", une formule qui indique qu'il s'agit non pas d'une relique mais d'un objet de dévotion »*, précise Nicolas Sarzeaud. Selon le pape, le père de ce sei-

PHOTO12/ARCHIVES SNARK

Le savant Nicole Oresme (vers 1320-1382), enluminure du XVe siècle.



MARCO BERTORELLO/AFP

Apparu pour la première fois vers 1354 à Lirey (Aube), peu de temps après avoir été fabriqué, le célèbre tissu est aujourd'hui conservé à la cathédrale Saint-Jean-Baptiste de Turin, en Italie (ici lors d'une exposition en 2015).

gneur avait placé l'objet dans la collégiale qu'il avait fondée à Lirey (Aube), mais la dévotion que celui-ci avait suscitée, inquiétant le diocèse, avait entraîné une enquête de l'évêque. *« L'Église se méfie de ces objets ambigus qui peuvent prêter à confusion et induire les fidèles en erreur »*, explique le médiéviste.

Face aux refus répétés de l'évêque de Troyes Pierre d'Arcis d'autoriser l'exposition du tissu, Geoffroy II de Charny s'adressa directement à l'autorité papale et obtint l'autorisation, en juillet 1389, de l'exposer à nouveau dans l'église. Toutefois, une condition lui est imposée : le « faux » linceul ne doit bénéficier d'aucun apparat liturgique de relique et il doit être fait publiquement mention qu'il n'est qu'une représentation (cette qualification restera d'usage jusqu'au XV[e] siècle lorsque, après l'entrée du tissu dans la maison de Savoie en 1453, il changera de statut et de trajectoire et deviendra par la suite le « suaire de Turin »).

C'est dans ce contexte qu'intervient la trouvaille majeure. Dans un traité sur les phénomènes inexpliqués daté entre 1355 et 1382, un savant normand du nom de Nicole Oresme pointait déjà du doigt un suaire *« miraculeux »* présenté à Lirey comme le *« linceul du Christ »*, pour illustrer comment des clercs pouvaient tromper afin d'attirer des offrandes.

Un cas d'école de mystification présenté dès avant 1382

Autrement dit, avant 1382, l'exemple de Lirey circulait déjà comme cas d'école de mystification. *« Oresme ne prend même pas la peine de décrire le suaire ni de revenir sur son histoire, comme si cet objet décrié était connu de tous,* affirme Nicolas Sarzeaud. *Ce texte, qui est un exemple de pensée critique médiévale passionnant, nous montre aujourd'hui qu'il n'y avait strictement aucun débat sur le caractère authentique de l'objet à l'époque. Pour ses propriétaires comme pour les autorités religieuses qui auraient préféré ne jamais en entendre parler, le tissu n'était qu'une représentation, en aucun cas une relique. »*

DANIELE MOLAJOLI / ACADÉMIE DE FRANCE-ROME-VILLA MÉDICIS

« Il est très rare d'avoir des sources ecclésiastiques médiévales aussi tranchées sur le caractère falsifié d'une relique »

Nicolas Sarzeaud, historien, membre associé du Centre de recherches historiques (EHESS/CNRS)

HYPOTHÈSES

Le mystère de la fabrication

Une certaine part de mystère subsiste tout de même concernant le suaire de Turin. Car, malgré de multiples analyses, il n'existe actuellement pas de consensus ferme sur la façon dont l'empreinte a été transférée sur le tissu. En réalité, l'image elle-même déroute : elle n'est ni une peinture, ni un simple contact. Les pigments sont absents et la coloration affecte uniquement la toute première couche des fibres, comme si elle résultait d'un brunissement superficiel par oxydation. Plusieurs hypothèses ont été avancées au cours des dernières décennies : l'artisan — ou devrait-on dire l'artiste — a-t-il fabriqué l'image par contact, en utilisant une statue ou un bas-relief lui-même enduit de pigments et chauffé ? C'est la piste évoquée dans une étude publiée en juillet dernier. D'autres chercheurs ont de leur côté suggéré une réaction chimique provoquée par les vapeurs du corps, voire l'emploi d'une technique de type photographique primitive, reposant sur l'action de la lumière et de sels sensibles. Plus audacieux encore, certains ont invoqué émission de radiation intense comme agent de formation de l'image, privilégiant ainsi la piste d'une « explosion » lumineuse localisée plutôt qu'un processus de peinture ou d'oxydation lente. Mais aucune de ces pistes ne s'impose pour le moment, nourrissant un débat où science, histoire et croyance continuent de s'entrelacer.

ANN RONAN PICTURE LIBRARY / PHOTO12/AFP

Le négatif photo du suaire de Turin réalisé par Secondo Pia en 1898.

Le texte est plus largement consacré aux *mirabilia*, « ce qui doit étonner », un terme qui englobe les phénomènes physiques et psychologiques perçus comme surprenants. *« À ces prodiges ou manifestations extraordinaires, mais aussi à des occurrences plus courantes telles que le somnambulisme ou la perte de cheveux, Oresme affirme qu'il faut privilégier les explications rationnelles et se méfier des interprétations divines, démoniaques ou dues à une influence inconnue »*, détaille Nicolas Sarzeaud.

Les écrits de Nicole Oresme renforcent la lecture, appuyée par d'autres sources du XIVe siècle, selon laquelle le tissu est une fabrication médiévale. Mais elle vient surtout apporter de nouvelles informations surprenantes : *« J'ai d'abord été surpris de constater que la fraude de Lirey était connue des lecteurs d'Oresme,* confie *l'historien. Pourtant, quand celle-ci a lieu vers 1355-1356* [c'est-à-dire quand la nouvelle se propage qu'un faux linceul du Christ est exposé], *le royaume sort d'une épidémie de peste et est encore en pleine guerre de Cent Ans. L'affaire a eu plus de retentissement que je le pensais, malgré ce contexte chargé. »*

Ce texte révèle une seconde réalité historique : pour tous les protagonistes de l'époque, y compris le propriétaire du tissu Geoffroy II de Charny, il n'y a aucune forme de débat sur la nature du linge. *« Personne ne le considère comme une relique, en l'occurrence comme le linceul mortuaire du Christ,* insiste l'historien. *Et j'ai même constaté, là encore avec beaucoup de surprise, que les sources étaient très claires sur ce point. Il est très rare d'avoir des sources ecclésiastiques médiévales aussi tranchées sur le caractère falsifié d'une relique. Cela prouve que l'enquête menée par l'évêque de Troyes, Henri de Poitiers, le prédécesseur de Pierre d'Arcis, a été bien menée. »*

Des savants et des théologiens pour distinguer le vrai du faux

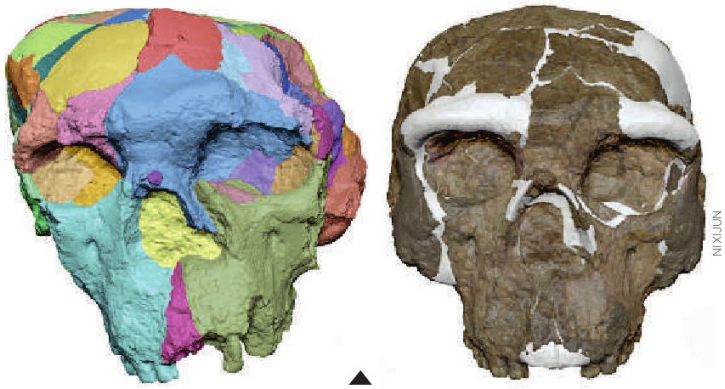
L'ouvrage de Nicole Oresme, enfin, met au premier plan le rôle social des savants. *« Au Moyen Âge, quand un évêque a un doute, il fait appel à des théologiens et des savants. L'intellectuel est considéré comme la figure publique capable de distinguer le vrai du faux,* affirme Nicolas Sarzeaud. *Cette figure va se construire autour des universités, au sein desquelles s'opère une forme de "starification" des maîtres, qui comptent des cortèges d'étudiants qui les suivent. »*

Maître à Paris devenu évêque de Lisieux, commentateur d'Aristote, Nicole Oresme va mettre la raison — *ratio*, en latin — au centre de sa réflexion, notamment lorsqu'il s'agit d'analyser et de hiérarchiser les témoignages : sont-ils nombreux ? Fiables ? Relatent-ils des observations directes et présentent-ils une distance critique suffisante ? Dans ce cadre, il rappelle ainsi que l'autorité d'un clerc ne vaut pas preuve et nous donne une leçon toujours d'actualité : quand l'émotion et l'apparence font masse, ce sont les procédures — les sources, les vérifications, la transparence des critères — qui protègent de l'erreur. Et donc de la supercherie. ■

Marine Benoit

Yunxian 2, le nouveau crâne de la discorde

Le fossile aurait des caractéristiques modernes incompatibles avec le consensus d'une différenciation de Sapiens en Afrique. Une hypothèse fragile.



NI XIJUN

Reconstruction virtuelle du crâne déformé (à gauche) de Yunxian 2, supposant une taille de cerveau plus grande qu'attendu (à droite).

Et si les humains modernes s'étaient séparés de leurs ancêtres bien plus tôt qu'on ne le pensait, et ce en Asie plutôt qu'en Afrique ? C'est ce que suggère une étude publiée dans *Science* fin septembre, et plus précisément un crâne écrasé découvert en Chine en 1990, baptisé Yunxian 2.

Initialement attribué à *Homo erectus*, en partie à cause de son âge estimé à 1 million d'années, Yunxian 2 serait, selon l'équipe de chercheurs majoritairement chinois, un membre primitif du clade *Homo longi*, aussi appelé « Dragon Man » et que l'on sait désormais lié génétiquement aux dénisoviens. Les chercheurs avancent que si des lignées comme celles des dénisoviens (et leurs proches comme Yunxian 2) étaient déjà présentes il y a un million d'années, *Homo sapiens,* qui partage un ancêtre commun avec eux, pourrait lui aussi remonter à un tronc plus ancien qu'on ne le croyait.

L'équipe propose une reconstruction virtuelle sophistiquée du crâne par tomodensitométrie et imagerie 3D. Ainsi « reformé », il apparaîtrait clairement que Yunxian 2 dispose d'une capacité crânienne plus grande qu'attendu. Par conséquent, ces caractéristiques proches de celles d'espèces que l'on pensait n'avoir existé que bien plus tard dans l'évolution humaine, l'apparenteraient à un *Homo longi* archaïque. Une thèse à prendre avec prudence car la fossilisation a causé des déformations et les reconstitutions virtuelles reposent sur de nombreuses suppositions. ■ **Marine Benoit**

LE CONSENSUS

Le consensus actuel veut que la lignée *H. sapiens* se soit différenciée de l'ancêtre commun aux néandertaliens et aux dénisoviens en Afrique il y a environ 600 000 ans, à 150 000 ans près.

L'HYPOTHÈSE ASIATIQUE

Les chercheurs chinois remettent en question le fait que notre ancêtre commun soit sorti d'Afrique. De l'étude du crâne Yunxian 2, ils déduisent que des formes humaines en Asie auraient évolué en parallèle. Selon eux, notre lignée aurait ainsi divergé hors d'Afrique.

LA QUÊTE D'UNE NOUVELLE ESPÈCE

Dès 2021, la même équipe avait formulé une théorie selon laquelle le fossile chinois appelé « Dragon Man » s'apparenterait à une nouvelle espèce humaine. Dénommée *Homo longi*, elle avait été considérée comme plus proche d'*H. sapiens* que ne l'est Neandertal. En 2025, une analyse paléogénétique l'a néanmoins attribuée à l'espèce dénisovienne.

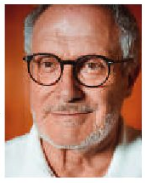
IL A DIT

JEAN-JACQUES HUBLIN

PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE, SPÉCIALISTE DE L'ÉVOLUTION DES HOMINIDÉS EN EURASIE ET EN EUROPE

« UN MANQUE D'ARGUMENTS SOLIDES »

« Ces résultats sont en complète contradiction avec tout ce que nous a appris la paléogénétique depuis quinze ans, et même avec presque cinquante ans de recherches sur l'anatomie des fossiles. Pour faire tomber autant d'acquis, il faut avoir des arguments très solides, ce qui n'est pas le cas ici. L'hypothèse la plus probable est que tous ces fossiles, y compris Dragon Man, constituent un groupe frère des néandertaliens et non des *H. sapiens*. Mais comme dans le cas de Dragon Man, il faudra désormais attendre que la génétique ou les protéines parlent. »



LÉA CRESPI/ PASCO&CO

Gödel et l'indécidabilité : des mythes à la réalité

Les théorèmes d'incomplétude de Gödel ont fait couler beaucoup d'encre en mathématiques et en logique, mais aussi dans des domaines comme la philosophie politique ou la psychanalyse. Pourtant, ces résultats sont souvent mal compris, aussi bien dans leur sens que dans leurs conséquences.

Par Antoine Houlou-Garcia

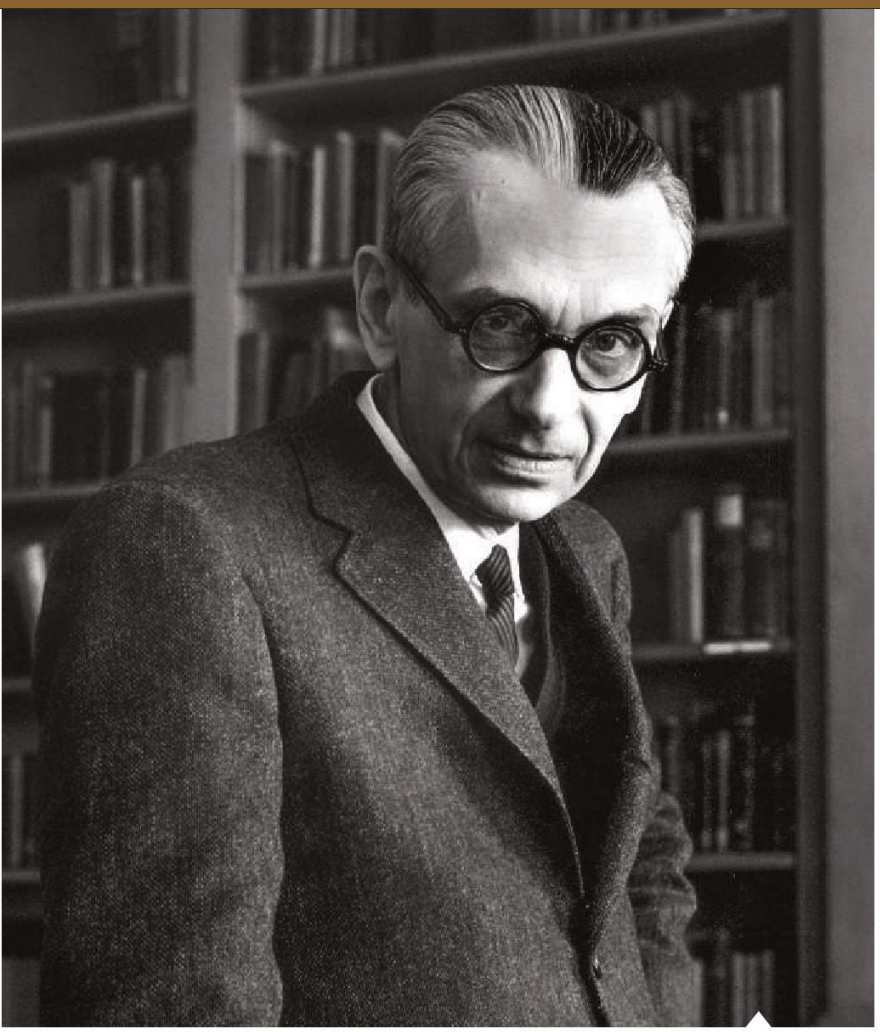
Kurt Gödel (1906–1978) est un logicien et mathématicien autrichien dont on aime à dire qu'il a fait voler en éclats toute l'architecture mathématique (voire plus). Ce que l'on en retient généralement consiste à dire qu'il existe des choses, en mathématiques ou ailleurs, dont on ne peut pas déterminer si elles sont vraies ou fausses ; ainsi les mathématiques sont incomplètes car elles ne peuvent pas elles-mêmes prouver, à l'intérieur de leurs propres règles, leur propre validité. Cela semble aussitôt permettre de dire des choses comme *« On ne peut jamais tout prouver, il y aura toujours des vérités qui nous échappent ! »*, voire *« Même un système aussi robuste que les maths s'avère incomplet, donc toute tentative d'expliquer le monde de manière logique est vouée à l'échec ! »* ou encore *« Gödel a prouvé que tout est relatif et qu'on ne peut jamais être sûr de rien ! »*

Sans tomber dans des phrases aussi exclamatives qu'on pourrait presque prononcer au bar, certains intellectuels y sont d'ailleurs allés de leur interprétation de ce résultat. Par exemple, le philosophe Régis Debray a transposé l'idée à une question humaine : une société ne peut pas se justifier uniquement par elle-même, tout comme les mathématiques ne peuvent se justifier par leurs propres règles. Une société a en effet besoin d'un principe extérieur à elle, une transcendance, pour se structurer et se légitimer. Cette transcendance peut prendre diverses formes : Dieu, la Raison, les droits de l'Homme, la Révolution… Car si elle cherche à s'autofonder entièrement, elle finit par s'effondrer ou par se retrouver dans une impasse.

Quant au psychanalyste Jacques Lacan, il s'intéresse à la formulation selon laquelle tout système non contradictoire ne peut être complet (parce qu'il y existe des propositions indécidables). Il y voit une confirmation de l'idée que tout système symbolique est fondamentalement incomplet. Le langage, qui structure notre rapport au monde et au désir, fonctionne comme un système formel,

A. HOULOU-GARCIA

Chargé de cours à l'université de Trente (Italie), Antoine Houlou-Garcia a publié en 2024 « Et la pomme ne tomba pas sur la tête de Newton. Ces petits mensonges qui ont fait l'histoire des sciences » (Albin Michel).



ALFRED EISENSTAEDT/THE LIFE PICTURE COLLECTION/SHUTTERSTOCK

Kurt Gödel (ici en 1956) publie son premier théorème de l'incomplétude à seulement 25 ans. En 1940, il fuit l'Autriche et émigre aux États-Unis. Devenu membre du très prestigieux Institut d'étude avancée de Princeton, il demande la citoyenneté américaine peu de temps après.

mais il est incapable de tout dire. Il y aura toujours un manque, une vérité indicible, un point d'impossibilité. Conséquence : tout sujet humain est lui-même divisé, fendu par le langage, et ne peut jamais se saisir totalement.

De telles interprétations, qui glissent du champ de la logique vers des domaines humains, ont certes une part de beauté mais ont été vertement critiquées pour leur manque de rigueur. On pensera notamment au livre *Impostures intellectuelles* (Odile Jacob, 1997) d'Alain Sokal et Jean Bricmont, mais aussi aux *Prodiges et vertiges de l'analogie* (Raisons d'agir, 1999) de Jacques Bouveresse, qui dénoncent les jeux de mots et glissements qui permettent de réinterpréter dans n'importe quel sens une proposition à l'origine précise et énoncée en termes mathématiques.

De façon simplifiée mais tout de même correcte, les théorèmes de Gödel (car il y en a deux) disent ceci : premièrement, toute théorie dans laquelle on peut faire de l'arithmétique est incomplète, ce qui signifie qu'il existe des énoncés exprimables dans cette théorie qui ne peuvent être ni démontrés ni réfutés dans cette même théorie. En termes encore plus simples : il peut s'avérer impossible de savoir si un certain résultat arithmétique est vrai ou faux dans la mesure où l'on utilise les outils de la théorie arithmétique. Cela ne veut pas dire que le résultat soit dans l'absolu indémontrable : en sortant de la théorie arithmétique (par exemple en lui ajoutant des axiomes), on pourra peut-être y parvenir ; simplement, en restant dans le cadre restreint de cette théorie, on n'y arrivera pas.

La démonstration de la limite de la formalisation des mathématiques

Deuxièmement, dans une théorie cohérente (c'est-à-dire dans laquelle il n'existe pas d'énoncé dont on puisse à la fois montrer la vérité et la fausseté), l'énoncé de la cohérence de la théorie en question ne peut être démontré dans le cadre de cette même théorie. Comme le note le mathématicien américain Raymond Smullyan, *« faire confiance à la cohérence d'un système sur le motif qu'il peut prouver sa propre cohérence serait aussi insensé que de faire confiance à la véracité d'une personne au motif qu'elle prétend dire toujours la vérité »*.

Ce sont les résultats majeurs d'un article que Gödel a publié en 1931 sous le titre « Sur les propositions formellement indécidables des *Principia Mathematica* et des systèmes apparentés », sachant que les *Principia Mathematica*, parus entre 1910 et 1913, sont une tentative des Britanniques Alfred North Whitehead et Bertrand Russell de fonder la logique moderne. Les théorèmes de Gödel s'inscrivent ainsi dans une histoire très précise de la formalisation des mathématiques et montrent la limite logique de cette ambition dans le cadre, *grosso modo*, de l'arithmétique et de la théorie des ensembles. Cela n'a donc pas vocation à être appliqué sans précaution à tous les domaines possibles, car rien ne dit que ces théorèmes resteront valides ailleurs que dans le cadre où ils ont été énoncés.

Le cas d'Hercule face à l'hydre *(lire l'encadré p. 88)* nous donne une stratégie pour sortir de l'incomplétude : compléter la théorie incomplète par des axiomes supplémentaires (en l'occurrence : les ordinaux infinis). Et on se dit qu'on pourrait finir par « remplir » tous les trous un à un pour obtenir une théorie parfaitement complète. Problème : il y a une infinité de trous !

Qu'à cela ne tienne : inventons un ordinateur capable de travailler durant un temps infini (ce qui n'a pas vraiment de sens) pour boucher les trous un à un en créant de nouveaux axiomes à chaque trou rencontré. Imaginons tout de même que cela fonctionne et qu'on bouche tous les trous. Nous savons qu'alors, notre super-théorie complète créera des incohérences : elle aura généré des énoncés contradictoires, en étant capable de démontrer à la fois la véracité et la fausseté d'une même proposition. C'est ce que nous dit le premier théorème de Gödel. Et c'est ce qu'a vérifié, par un approfondissement plus récent au début des années 2000, le logicien russe Leonid Levin. Est-ce pour autant une terrible chose ? Pas forcément : cela signifie qu'il y aura toujours une infinité de choses à chercher et à inventer en mathématiques. L'infinité de trous dans une théorie, c'est aussi et avant tout l'infinité de nos possibilités pour la développer ! ■

GRANGER/BRIDGEMANIMAGES

◄ **Représentation d'Hercule** (Héraclès dans la mythologie grecque) combattant l'Hydre de Lerne, créature à plusieurs têtes. Lorsque l'on coupait l'une d'elles, il en repoussait deux à la place (amphore, vers 500-490 avant notre ère).

APPLICATION

Le combat d'Hercule contre l'hydre, un exemple d'indécidabilité

Les mathématiciens britanniques Laurie Kirby et Jeff Paris ont imaginé un exemple d'indécidabilité en 1982 : Hercule contre l'hydre de Lerne, avec quelques modifications par rapport au mythe. L'hydre est représentée sous forme de graphe composé d'un tronc, de cous et de têtes. Hercule ne peut couper que les têtes. Lorsqu'une tête est coupée, le cou correspondant (le dernier trait) disparaît mais deux situations sont possibles : si cette tête est directement accrochée au tronc, alors il ne se passe rien de plus. En revanche, si cette tête est accrochée à un nœud, alors l'hydre se régénère en répliquant la partie située en dessous du nœud correspondant. L'hydre réplique autant de fois cette partie qu'elle aura été frappée par Hercule : ainsi, lors de la première coupe, l'hydre se réplique une fois tandis qu'elle se réplique trois fois lors de la troisième coupe.

Avec le phénomène de réplication, on a l'impression que le nombre de têtes de l'hydre va augmenter à l'infini et qu'Hercule ne s'en débarrassera jamais. En réalité, quelle que soit la stratégie d'Hercule (même s'il attaque l'hydre au hasard), le nombre de têtes finit par diminuer au bout d'un certain temps (qui peut être assez long mais qui finit toujours par arriver) : cela est dû au fait que peu à peu les nouvelles têtes se rapprochent du tronc et finiront donc par être coupées sans générer de réplication.

Pourtant, Kirby et Paris ont montré qu'il est impossible de démontrer qu'Hercule gagnera contre n'importe quelle forme d'hydre si l'on reste dans la théorie arithmétique. En revanche, il est possible de démontrer la victoire systématique d'Hercule si on sort de la théorie arithmétique : il faut en effet lui ajouter une notion d'infini. Pourquoi cela ? Tout simplement parce que l'hydre aura toujours un nombre de têtes inférieur à un certain nombre, mais que ce « certain nombre » est potentiellement très (très) grand. On ne parle pas ici de l'infini noté ∞ mais d'un concept plus structuré : « l'ordinal infini », noté ω, et dont les propriétés sont un peu particulières. Par exemple, $\omega + \omega = 2\omega$ de même que $\omega \times \omega = \omega^2$ (alors que $\infty + \infty = \infty$ et $\infty \times \infty = \infty$). On peut alors modéliser la « force » de l'hydre :

- chaque tête vaut 0 ;
- chaque cou final vaut 1 ;
- chaque nœud vaut la somme des cous correspondants ;
- chaque cou non final vaut ω à la puissance du nœud juste au-dessus.

On peut alors montrer qu'au fil des coupes, la force de l'hydre diminue jusqu'à atteindre zéro. Ce qui signifie que toutes les têtes sont coupées. Ainsi, la victoire d'Hercule est un indécidable de la théorie arithmétique que l'on peut néanmoins démontrer en amplifiant la théorie arithmétique grâce à la notion d'ordinal infini. C'est, historiquement, la première illustration relativement simple de l'incomplétude.

DIMITRI PAVLENKO

7H - 9H
EUROPE 1 MATIN

Europe 1
LA RADIO LIBRE

CapaPictures / Europe 1

RENDEZ-VOUS

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

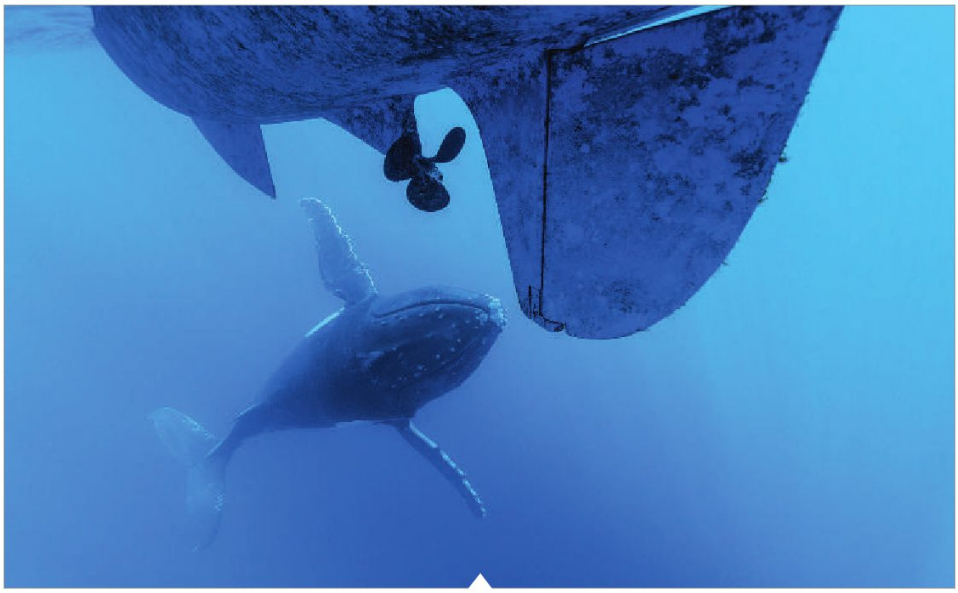
▶ C'est à voir
p. 92

▶ Questions de lecteurs
p. 94

▶ Courrier
p. 95

▶ Le ciel du mois
p. 96

▶ À retrouver sur notre site
p. 98



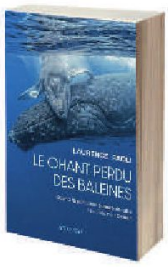
CHRISTOPHER SWANN/BIOSPHOTO

La pollution sonore des océans (navires, forages, éoliennes…) a des effets délétères sur les cétacés.

Sous la mer, le bruit tue

Ce livre-enquête retrace l'émergence de la bioacoustique et la prise de conscience des ravages de la pollution sonore sur les animaux marins.

ENQUÊTE On peut mieux comprendre le monde en l'écoutant : c'est l'enseignement de l'impressionnante recherche menée par Laurence Paoli autour des ravages de la pollution sonore qui frappe les profondeurs sous-marines. L'auteure assume, avec une pincée d'humour, le déroulé à la première personne d'une enquête inédite, vaste et ardue. Elle en pose les bases en détaillant les principes de la physique du son, avec son cortège de hertz et de décibels, et la découverte révolutionnaire dans les années 1940 d'un canal horizontal virtuel — baptisé Sofar, pour Sound fixing and ranging — grâce auquel *« les baleines s'entendent à travers les océans »*, puisqu'il permet la transmission des ondes acoustiques sur des milliers de kilomètres.

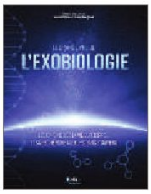


Son récit fait remonter la prise de conscience à la fois des effets néfastes des bruits produits par les humains et de l'importance de l'ouïe pour le cycle de vie des animaux marins, aux données obtenues par les sonars de l'armée américaine, autour de 1946. À compter de cette date, défile, par le biais des analyses d'une cohorte de spécialistes, l'histoire passionnante qui conduit des prémices de l'écoute du vivant — le chant modulé des baleines, le cri du manchot empereur, les clics enchaînés des cachalots — à l'essor de la bioacoustique. Sans oublier l'implacable constat des liens de cause à effet, par exemple, entre prospections sismiques en vue de l'exploitation pétrolière et échouages en masse de cétacés. Et on prend conscience, dans la dernière partie de l'ouvrage, de l'incroyable complexité de la mise en place de réseaux multidisciplinaires d'action collective pour la protection de la vie sous-marine ! ■

Andreina De Bei

Le Chant perdu des baleines. Quand la pollution sonore étouffe les voix de l'océan, Laurence Paoli, Actes Sud, 352 p., 23,50 €

La vie ailleurs ?



ORIGINES Quels processus auraient accompagné, sur Terre, le passage de l'inerte au vivant ? Quels critères permettent de qualifier certaines planètes d'habitables ? Pourrons-nous un jour détecter d'éventuels signes de vie sur des planètes extrasolaires ? 28 chercheurs, parmi les meilleurs dans leur domaine (astrophysique, planétologie, chimie, géologie, biologie…), font le point des connaissances sur ces questions vertigineuses dans une somme très complète sur les origines de la vie et sa recherche dans l'Univers. ■ **F. D.**

Le Grand Livre de l'exobiologie, H. Cottin et M. Gargaud (dir.), Belin, 336 p., 36 €

Faire face au froid

ÉPOPÉE De la préhistoire à nos jours, du Japon à l'Europe, en passant par le Groenland ou la Mongolie, chaque civilisation a appréhendé la lutte contre le froid à sa manière, en développant ses propres solutions de chauffage, de logement, d'habillement… En 37 chapitres aussi brefs qu'instructifs, ce livre en fait le tour. Et creuse les enjeux actuels : comment lutter contre la précarité énergétique ? limiter l'impact environnemental de nos modes de chauffage ? faire face à la chaleur excessive liée au changement climatique ? ■ **V. G.**

Le Peuple des frileux, Olivier Jandot et Renan Viguié, Grasset, 256 p., 22 €

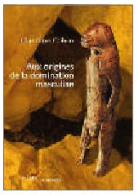
Le musée recomposé

ENGAGEMENT Alors que le nouveau musée de l'Homme fête ses 10 ans, sa directrice se livre à une réflexion sur ce que doit être un musée aujourd'hui. *« On ne vient plus seulement y admirer des œuvres ou y lire l'histoire officielle. On y vient pour questionner, confronter, construire ensemble. »* Le public n'attend plus un simple espace neutre, mais une programmation engagée sans être militante. En retraçant l'histoire des musées, l'auteure montre comment ils sont devenus des miroirs de leur époque et des lieux de débats. ■ **M. N.**

Pour un musée engagé, Aurélie Clemente-Ruiz, L'Aube, 152 p., 16 €

Le patriarcat a vécu

IDÉE RECUE La protohistorienne Claudine Cohen tord le cou à l'une des idées reçues les plus persistantes : le patriarcat serait un invariant de l'organisation humaine depuis la préhistoire. La domination masculine, *« une des structures sociales les plus prégnantes et les plus résistantes des sociétés humaines »*, n'est en effet en rien une donnée naturelle. La chercheuse nous entraîne aux origines de l'humanité afin de mieux comprendre le processus qui a conduit à l'apparition des premières traces de domination exercée par les hommes sur les femmes. ■ **M. B.**

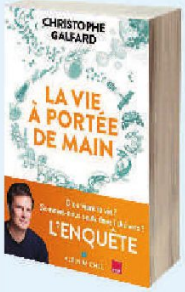


Aux origines de la domination masculine, Claudine Cohen, Passés Composés, 220 p., 20 €

Quand les animaux flairent la mort

ÉTHOLOGIE Des fourmis qui se font exploser pour éviter l'invasion de la fourmilière ; des prédateurs qui font semblant d'être morts pour duper leurs proies ou *vice versa* ; des mères primates et cétacés qui transportent le cadavre de leur enfant ; des animaux qui semblent se laisser mourir en captivité, voire se suicider. Comment les animaux perçoivent-ils la mort ? Dans un essai vivifiant, illustré par les croquis pleins d'humour d'Arnaud Rafaelian, Emmanuelle Pouydebat (Muséum national d'histoire naturelle, CNRS), spécialisée dans l'évolution des performances et des comportements animaux, réanalyse les données d'éthologie et revient sur des questions qui hantaient déjà Charles Darwin. Dénier chagrin ou émotion aux animaux autorise à les faire souffrir ou à les tuer sans penser à mal, note-t-elle, en soulignant les œillères de ceux qui ont longtemps sous-estimé les capacités de ces derniers. ■ **Rachel Mulot**

Les oiseaux se cachent-ils pour mourir ? Emmanuelle Pouydebat, Delachaux et Niestlé, 192 p., 22,90 €



Fresque scientifique

EXPLORATION Qu'est-ce qui définit le vivant ? Comment la vie est-elle apparue sur Terre ? Sommes-nous seuls dans l'Univers ? Dans ce nouveau livre, le physicien Christophe Galfard entraîne le lecteur à la recherche de réponses au fil d'un récit qui fait la part belle à l'histoire des découvertes. Il nous fait voyager dans le temps et l'espace pour revivre, par exemple, les dernières heures des dinosaures et l'enfer planétaire provoqué par la chute d'une énorme météorite il y a 66 millions d'années. Ou encore pour plonger au sein d'une cellule en compagnie d'un petit robot jaune afin d'y découvrir les secrets de l'ADN et de l'ARN, dans les abysses près de cheminées hydrothermales pour remonter l'histoire de la vie, à la recherche d'un ancêtre commun à toute la vie terrestre appelé Luca (pour Last universal common ancestor), qui aurait vécu il y a environ quatre milliards d'années. Une fresque scientifique vaste et passionnante. ■ **Sylvie Rouat.**

La Vie à portée de main, Christophe Galfard, Albin Michel, 560 p., 22,90 €

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

EXPOSITIONS

Cherbourg (50)

▶ **Astérix et la mer**
Les aventures du petit Gaulois créé par Goscinny et Uderzo servent de prétexte à décortiquer le monde maritime de l'Antiquité. Comment naviguait-on, sur quelles routes, dans quelles conditions ?
Cité de la mer, jusqu'au 31 mai 2026. Rens. : 02.33.20.26.69.

Lamballe (22)

▶ **Réveiller les animaux disparus**
Entre 1942 et 1947, les artistes Yvonne Jean-Haffen et Mathurin Méheut réalisent pour l'Institut de géologie de Rennes 25 tableaux, dont des représentations d'animaux disparus. Ceux-ci sont présentés associés à des travaux scientifiques.
Musée Mathurin Méheut, 15, place du Champ-de-Foire, jusqu'au 3 janvier 2026. Rens. : 02.96.31.19.99.

Lodève (34)

▶ **Anatomie comparée des espèces imaginaires**
Des créatures fictives, issues de légendes ou de la culture populaire (la Vouivre, Chewbacca, Totoro…) permettent d'aborder l'anatomie comparée sous un angle scientifique.
Musée de Lodève, square George-Auric, jusqu'au 15 mars 2026. Rens. : 04.67.88.86.10.

Mende (48)

▶ **Ours : mythes et réalités**
Le sujet nourrit trois thématiques : les mythes et représentations ; les connaissances scientifiques ; les enjeux de la cohabitation entre humains et ours.
Musée du Gévaudan, 3, rue de l'Épine, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : 04.66.49.85.85.

Morlaix (29)

▶ **Grande vitesse**
Reprise d'une coproduction de l'Espace des sciences de Rennes et Universcience en 2017, ce parcours mêle patrimoine ferroviaire, ingénierie et défi technologique : faire rouler des trains à 320 km/h.
Espace des sciences, 42, quai du Léon. Rens. : 02.98.15.29.27.

Nemours (77)

▶ **Pouvoir et métal**
Le parcours détaille les savoir-faire et modes de vie des sociétés de l'âge du bronze dans le Bassin parisien, avec leurs impressionnants réseaux d'échanges destinés à la production de l'alliage de cuivre et d'étain.
Musée de Préhistoire d'Île-de-France, 48, avenue Étienne-Dailly, jusqu'au 30 décembre. Rens. : 01.64.78.54.80.

Paris (75)

SCIENCES AVENIR PARTENARIAT

▶ **Migrations et climat**
Les migrations, pas seulement humaines, liées au dérèglement climatique, sont évoquées par le biais de photographies documentaires, de témoignages, d'infographies, mais aussi d'œuvres d'art et d'installations.
Musée national de l'Histoire de l'immigration, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 5 avril 2026. Rens. : www.palais-portedoree.fr

▶ **Magellan, un voyage qui changea le monde**
La première circumnavigation entreprise par Magellan, entre 1519 et 1522, est racontée en six espaces dans un tour du monde immersif.
Musée national de la Marine, 17, place

INSTANTSCIENCE

Un chantier de fouilles reconstitué permet aux visiteurs petits et grands de jouer aux apprentis archéologues en mettant au jour des vestiges datant de l'époque romaine.

Elbeuf (76) / Exposition

Archéo, une expo à creuser

« *La fouille, c'est une petite part dans le travail d'un archéologue* », avertit Jérôme Tabouelle, responsable des collections de sciences et d'archéologie de la Fabrique des savoirs, près de Rouen. C'est néanmoins coiffés d'un casque de chantier et vêtus d'un gilet jaune que les visiteurs (à partir de 7 ans) s'engouffrent sur un chantier de fouilles reconstitué. Les apprentis archéologues doivent y retrouver des objets de l'époque romaine, armés de truelles et de pinceaux. Interdiction de marcher sur le sable : on doit naviguer sur des planches en bois et travailler dans un espace quadrillé, « comme en vrai ». Tessons, monnaie, amphore… Les objets sont des copies de trouvailles de la villa gallo-romaine du Val Caron, à Elbeuf (Seine-Maritime). Afin d'étudier ensuite ces artéfacts, les visiteurs de cette exposition ludique et familiale troquent leur gilet jaune contre une blouse blanche, se familiarisant avec des disciplines comme la céramologie, la carpologie (étude des graines), ou encore la numismatique (étude des monnaies).
Lire notre reportage : sciav.fr/945archeo ■
Aurore Neyrat

Fabrique des Savoirs, 7, cours Gambetta, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : 02.32.96.30.40.

du Trocadéro, jusqu'au 15 février 2026. Rens. : sciav.fr/945museemarine

▶ **Les illusions retrouvées, nouvelles utopies à l'ère numérique**
Et si humains, technologies et nature trouvaient un équilibre ? Ces œuvres numériques donnent leur vision du futur en s'appuyant sur des données scientifiques sur le ciel ou la physique quantique.
Centquatre, 5, rue Curial, jusqu'au 11 janvier 2026. Rens. : 01.53.35.50.00.

▶ **Jardiner**
L'art du jardinage croise la science dans un parcours où il est question de relations interespèces, de biodiversité du sol, mais aussi de réflexions sur les pratiques actuelles et à venir.
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou. Rens. : 01.85.53.99.74.

Pont-de-Claix (38)

▶ **Alp et le dragon-rivière**
Destinée aux 4-8 ans, guidés par un médiateur scientifique, cette exposition interactive est consacrée aux cours d'eau, à leur trajet, leur biodiversité, leur rythme. Observation, jeux de rôle et réflexion sont au programme.
Cosmocité, 85, cours Saint-André. Rens. : 04.80.42.34.34.

Rennes (35)

▶ **Quand la Terre tremble**
Tout sur les séismes, les méthodes pour les mesurer, mais aussi les moyens de s'en protéger.
Espace des sciences, les Champs Libres, 10, cours des Alliés, jusqu'au 8 mars 2026. Rens. : 02.23.44.66.00.

Saint-Étienne (42)

▶ **Graines**
Une trentaine de manipulations consacrées aux facultés et au rôle des graines. Comment se déplacent-elles ? Quel animal est le meilleur pollinisateur ? Etc.
La Rotonde, 158, cours Fauriel, jusqu'au 21 février 2026. Rens. : 04.77.42.02.78.

Strasbourg (67) / Musée

Musée zoologique

Après six années de travaux, le musée a rouvert le 19 septembre avec pour volonté de *« créer un dialogue entre les sciences et la société »*, explique Enrica Zanin, vice-présidente de l'université de Strasbourg, où se situe l'établissement. Ce dernier présente 1800 spécimens, tels l'incroyable cœlacanthe africain ou le thylacine et le grand pingouin — espèces aujourd'hui disparues —, avec des dispositifs interactifs et des vidéos. *« On passe d'un musée du XIXe siècle, qui était un musée de classification, à un musée avec une trame narrative »*, explique Samuel Cordier, son directeur. Un imposant cyclorama consacré aux écosystèmes du Rhin supérieur et l'exposition des espèces locales rappellent que le fleuve a été largement dompté par l'humain à force d'aménagements.
Lire notre reportage : sciav.fr/945zoo ■ **Anne-Sophie Tassart**
Musée zoologique, 29, boulevard de la Victoire. Rens. : 03.68.98.50.00.

M. BERTOLA - MUSÉES DE STRASBOURG

Modèle de méduse en verre de Léopold et Rudolf Blaschka (1894).

FESTIVAL

Montrouge (92)

▶ **Explor'Espace**
L'Association française d'astronomie organise trois jours de spectacles, d'immersions, et de rencontres avec des astrophysiciens et astronautes (Jean-François Clervoy, Rosemary Coogan, Matthias Maurer...).
Beffroi, 2 place Emile-Cresp, du 7 au 9 novembre. Rens. : explorespace.afastronomie.fr

Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir**

MASAMINE KAWAGUCHI / YOMIURI / THE YOMIURI SHIMBUN VIA AFP

Cérémonie du Kamuynomi chez les Aïnous (ici près d'Eniwa, au nord du Japon, en 2019) afin d'assurer la protection des voyageurs.

ANTHROPOLOGIE

Pourquoi les humains utilisent-ils le surnaturel pour expliquer le monde qui les entoure ?

David K.

Les croyances surnaturelles accompagnent l'humanité depuis ses débuts. Jusque dans la forêt équatorienne, où le peuple chachi attribue la foudre *« à l'éclat de l'épée portée par l'esprit du tonnerre »*. Comme lui, d'innombrables sociétés ont cherché dans le surnaturel des explications aux mystères de leur environnement. Des travaux publiés en avril 2023 dans la revue *Nature Human Behaviour* confirment ce penchant universel : toutes les 114 sociétés étudiées, du XVIIIe au XXe siècle, recouraient au surnaturel pour expliquer certains phénomènes. Ces croyances ont été documentées dans des contextes variés : groupes de chasseurs-cueilleurs, sociétés d'horticulteurs, pêcheurs ou encore grandes communautés urbanisées.

Les événements naturels semblent propices à ce type d'explications : 96 % des sociétés invoquaient des forces invisibles pour expliquer les maladies, 92 % les pénuries alimentaires et 90 % les catastrophes naturelles. Pour le peuple aweikoma (ou xokleng) au Brésil, *« les gens tombent malades et meurent parce qu'ils sont attaqués par un* nggïyúdn [sorte d'esprit] *qui leur veut du mal »*, écrivent les anthropologues. Chez les sorciers du peuple asiatique aïnou, sécheresses et inondations étaient vues comme une punition spirituelle.

Les phénomènes sociaux sont, eux, moins souvent interprétés de manière surnaturelle : seulement 67 % des sociétés reliaient les guerres au monde invisible, 82 % les meurtres, et à peine 26 % les vols. Cependant, cette tendance varie selon le type de société. Plus les communautés sont grandes et denses, plus elles attribuent au surnaturel des événements sociaux. *« Cela pourrait indiquer que les explications surnaturelles sont plus courantes pour les événements dont l'agent responsable n'est pas clairement identifié »*, analysent les chercheurs.

Ces croyances rempliraient aussi une fonction sociale : en proposant un système commun de valeurs et de rituels, elles renforcent la cohésion des groupes. Elles créent des normes partagées, facilitent la coopération et cimentent l'identité collective. En somme, qu'il s'agisse de conjurer les catastrophes naturelles ou de renforcer les liens sociaux, le recours au surnaturel a permis aux sociétés humaines de donner du sens à l'imprévisible et de mieux vivre ensemble. ■

Camille Gaubert

ZOOLOGIE

Comment les chats voient-ils leur environnement ?

Angélique B.

Les chats voient le monde bien différemment de nous. Nyctalopes, ces félins perçoivent les moindres lueurs grâce à une forte densité de bâtonnets dans la rétine et une courbure oculaire qui capte mieux la lumière. Leur vision des couleurs est limitée : ils distinguent surtout le bleu et le jaune, pas le rouge, d'où un monde aux teintes pastel. Leur champ de vision panoramique atteint 260° (bien au-delà de nos 180°). Ils ne voient nettement que les objets qui se trouvent de 2 à 6 mètres d'eux, et distinguent mal ce qui est très proche ou très éloigné. En revanche, ils perçoivent très bien les mouvements, un véritable atout pour chasser. ■ **Anne-Sophie Tassart**

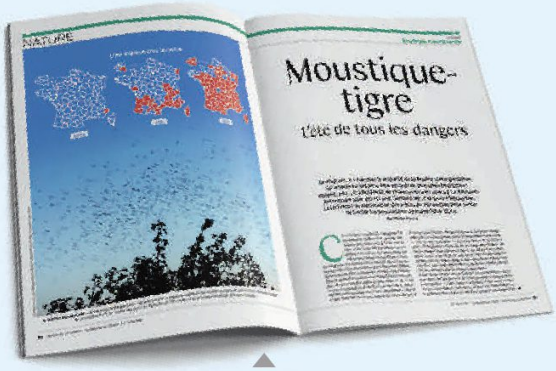
PHYSIOLOGIE

Peut-on être ivre sans avoir bu la moindre goutte d'alcool ?

Belkhir K.

Aussi surprenant que cela paraisse, oui, c'est possible ! C'est ce qu'on appelle le syndrome d'auto-brasserie. Rare, ce trouble — qui reste controversé par manque d'études — est causé par une prolifération de levures intestinales (comme *Saccharomyces cerevisiae*), qui transforment les glucides des aliments en alcool. Résultat : des patients peuvent présenter un taux d'alcool élevé, voire des symptômes d'ivresse, sans avoir bu une seule goutte. Ce syndrome se traite par des antifongiques et un régime pauvre en glucides. ■ **Lise Loumé**

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**



« Moustique-tigre : l'été de tous les dangers »
(*Sciences et Avenir* n° 941-942, juillet-août 2025)

Merci encore pour tous vos sujets si diversifiés et étayés ! Dans le numéro d'été, il est mentionné que le moustique-tigre va prendre le dessus sur les espèces existantes. Pouvez-vous expliquer le phénomène des espèces invasives ? **Bruno Saillard**

S. et A. : Dans le cas du moustique-tigre, qualifié d'espèce invasive, le phénomène ne repose pas uniquement sur la disponibilité en ressources alimentaires (le sang pour les femelles), mais surtout sur sa forte compétitivité vis-à-vis d'autres espèces de moustiques ou d'insectes qui exploitent les mêmes gîtes larvaires. Le moustique-tigre est une espèce principalement urbaine, qui tire parti d'une grande diversité et d'une quantité importante de gîtes artificiels créés par les humains (petits contenants, coupelles, seaux, gouttières, etc.). Cette capacité à coloniser efficacement les environnements urbains lui confère un avantage marqué sur d'autres espèces locales, qui sont alors progressivement supplantées. Ce n'est pas tant l'abondance de nourriture qui explique son expansion en milieu urbain, mais plutôt sa compétitivité écologique et sa capacité à exploiter les habitats artificiels générés par nos modes de vie.

Isolante paille

L'article « Quand la paille défie le béton » (*S. et A.* n° 941-942) est très intéressant. Je suis convaincu par les différents principes énoncés sur les qualités de ce matériau. Néanmoins, je me pose la question des éventuels sinistres. Comment la paille est-elle traitée ? **Lionel Goux**

S. et A. : Pour être autorisé sur le marché de la construction, le matériau paille a bien évidemment fait l'objet de tests de résistance au feu, lesquels attestent que les murs en paille sont conformes aux exigences réglementaires. Comme l'écrit le Réseau français de la construction en paille, *« pour qu'un objet brûle il lui faut de l'oxygène. Une feuille de papier brûle aisément contrairement à un dictionnaire qui se consumera lentement. Il en est de même pour la paille qui, compressée en bottes denses, ne s'enflamme pas mais se consume très lentement, en ne dégageant qu'une faible quantité de fumée, facteur important pour la sécurité des personnes. »*

Panneaux solaires

Dans votre article sur l'installation de panneaux solaires (*S. et A.* n° 943), vous n'évoquez pas le cas des toitures d'immeubles en copropriété, offrant pourtant un énorme potentiel. La législation en vigueur pour les travaux d'entretien ou de modernisation et les pratiques habituelles (syndicats de copropriétés, syndics…) sont non seulement guère favorables en ce domaine, mais quasiment dissuasives à l'égard de projets de cette nature, vu leur complexité. Peut-on espérer voir bouger les choses ? **Jean-Michel Person**

S. et A. : Un projet solaire en copropriété est loin d'être impossible et les soutiens existent, comme celui de CoachCopro, le service public de la rénovation des copropriétés, qui propose notamment son aide sur ce sujet. L'Association des responsables de copropriétés (ARC) a également publié un guide « Installations photovoltaïques dans une copropriété » en 2024.

LE CIEL DE NOVEMBRE

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

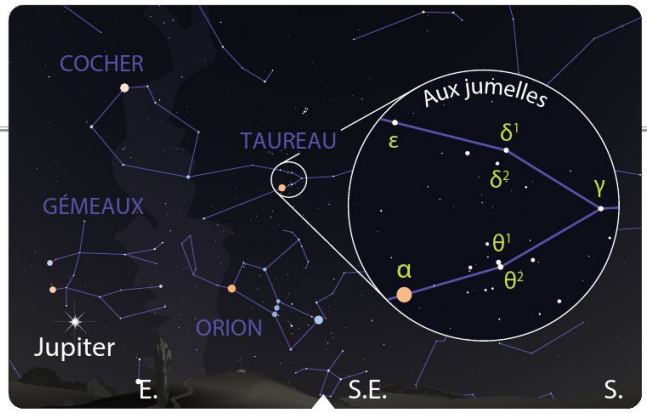
MERCURE Après son passage en conjonction inférieure le 20, la petite planète devient observable le matin en toute fin de mois, vers le sud-est. Elle reste très basse et nécessite un horizon bien dégagé pour être repérée, peu avant l'aube.

VÉNUS L'étoile du Berger se lève 1h30 avant l'astre du jour le 1er mais, au fil des semaines, elle disparaît progressivement dans les lumières du levant.

MARS La planète Rouge n'est pas visible ce mois, trop proche de la direction du Soleil.

JUPITER La plus massive des planètes se lève en soirée et culmine très haut dans le ciel de fin de nuit, à plus de 60° de hauteur. Située actuellement dans la constellation des Gémeaux, elle est très brillante et attire inévitablement l'œil du promeneur matinal. Ses quatre principaux satellites sont décelables à l'aide d'une paire de jumelles.

SATURNE Modestement brillante, la planète aux anneaux se dévoile dès la tombée de la nuit vers le sud-est. C'est en soirée qu'elle atteint sa hauteur maximale au-dessus de l'horizon, dans la direction du sud. On la trouve alors à mi-hauteur dans le ciel. Saturne occupe la constellation du Verseau.



En novembre, le « V » caractéristique des Hyades domine le Sud-Est à 23 h. Avec Aldébaran (α) au premier plan, ce joyau céleste lance le défilé des constellations d'hiver.

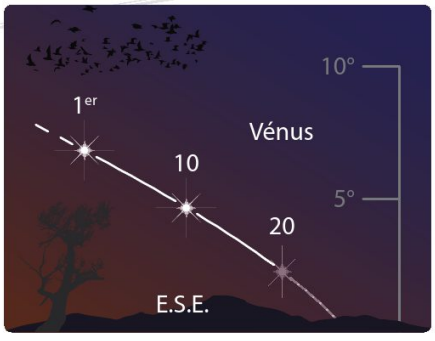
Les Hyades, l'amas d'étoiles le plus proche

FACILES À REPÉRER À L'ŒIL NU, les Hyades dessinent un « V » plus ou moins couché au cœur de la constellation du Taureau. Situé à seulement 150 années-lumière de la Terre, ce regroupement est l'amas d'étoiles le plus proche, un splendide exemple de ce type d'objets. À noter que l'étoile la plus brillante du « V », Aldébaran (α), bien plus près de nous, n'en fait pas partie !

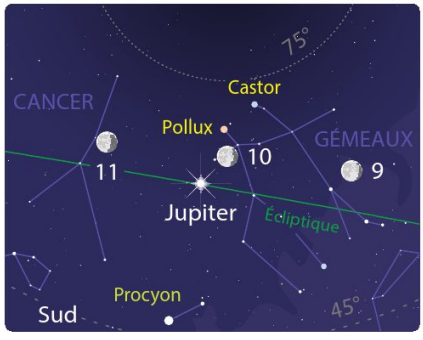
Notre conseil Trouvez d'abord le « V » des Hyades, près d'Aldébaran, facilement visible à 23 h. Des jumelles en révèlent une trentaine d'étoiles, dont vous pouvez comparer la couleur à la teinte cuivrée d'Aldébaran. Contraste garanti !

L'appli du mois

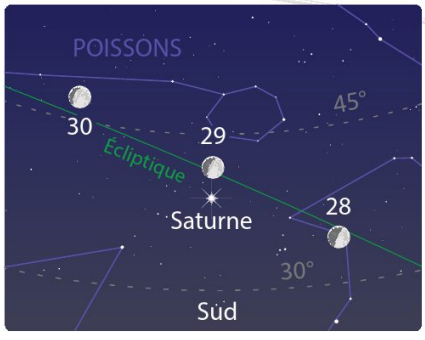
STAR TRACKER est une application gratuite en anglais pour Android et iOS avec achats intégrés. Elle transforme votre smartphone en planétarium interactif. Pointez-le vers le ciel pour identifier étoiles, constellations, planètes et objets du ciel profond. L'appli fonctionne hors ligne, propose un mode nuit et une version pro enrichie. Idéale pour explorer le ciel simplement !



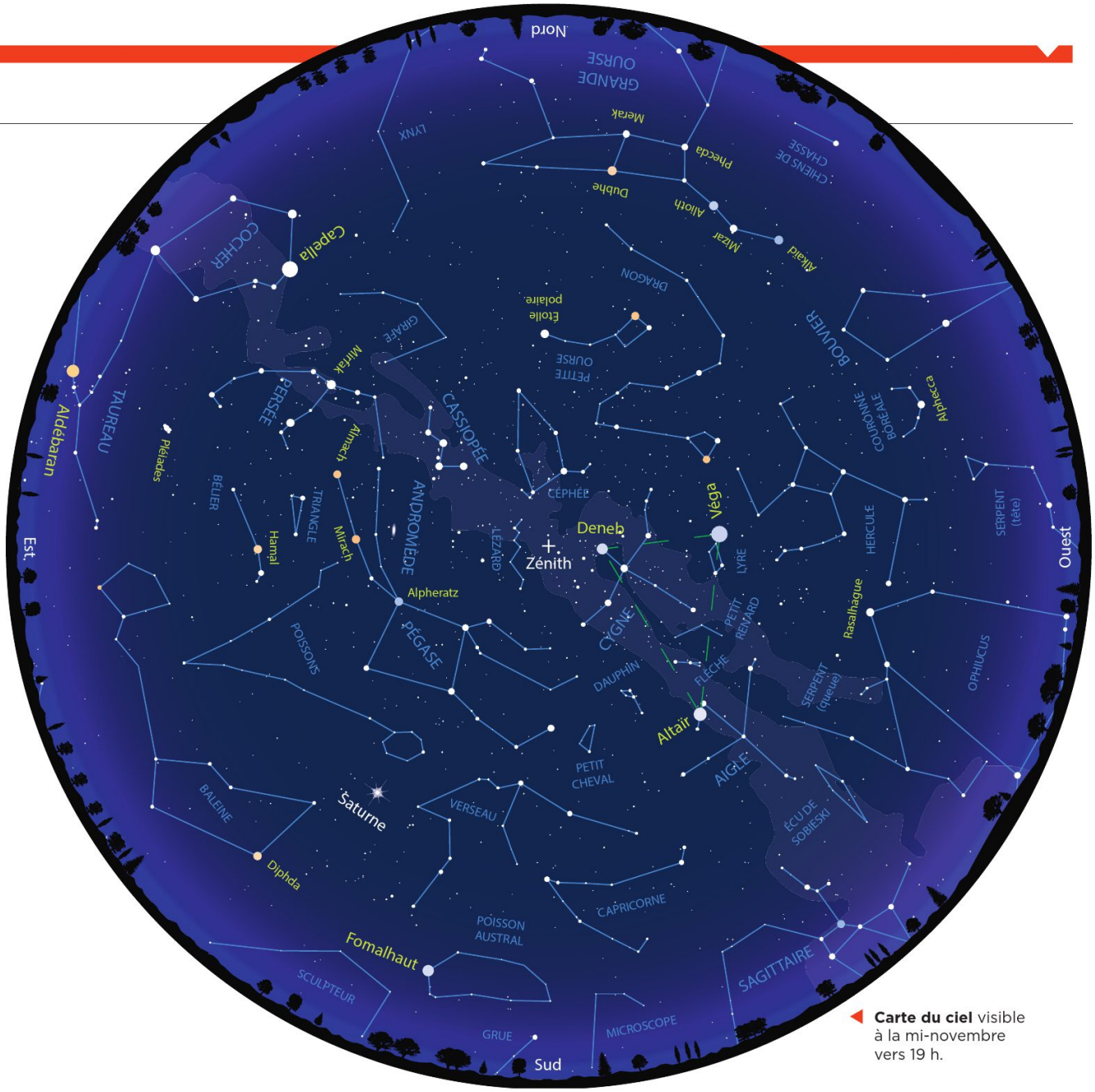
IL EST ICI 45 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL. Vénus brille intensément à l'est-sud-est mais son déclin est rapide. À savourer sans tarder… car elle disparaîtra vite.



LE 10, VERS 6 H DU MATIN, la Lune en phase gibbeuse décroissante accompagne Jupiter dans les Gémeaux, formant un duo spectaculaire bien au-dessus de l'horizon sud.



LE 29, VERS 20 H, le globe lunaire trône à moins de 3° de la planète Saturne dans la direction du sud, offrant une belle scène à observer aux jumelles.



Carte du ciel visible à la mi-novembre vers 19 h.

La Lune

Pleine Lune : mercredi 5 à 14 h (la Lune se trouve alors dans la constellation du Bélier)

Dernier quartier : mercredi 12 à 6 h (Lion)

Nouvelle Lune : jeudi 20 à 8 h (Balance)

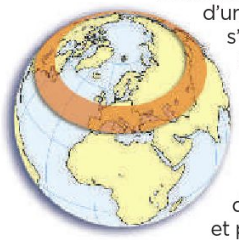
Premier quartier : vendredi 28 à 8 h (Verseau)

Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er novembre	7h39	17h29
30 novembre	8h23	16h55

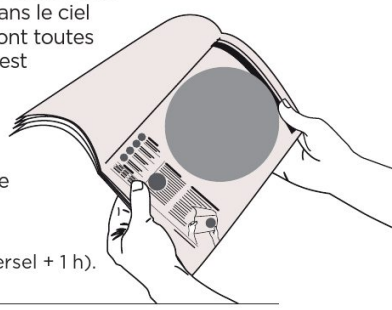
D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel, et plus basse dans le cas contraire.



Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 1 h).

Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

REPORTAGE

Une mini-ville pour former les chiens-guides

QUENTIN DURAND

À Coubert (Seine-et-Marne), l'École des chiens-guides d'aveugles d'Île-de-France utilise des installations étonnantes pour former une dizaine de chiens par an et les préparer au mieux à leur futur travail. sciav.fr/945chien

RENCONTRE

Vie de château pour les enfants atteints d'un cancer

CLEMENT MATTEOLI

À Marseille, le Château des sourires s'apprête à accueillir une cinquantaine d'enfants atteints de cancer. Au cœur d'un parc de cinq hectares, la bâtisse devra leur faire retrouver un peu de leur insouciance pour mieux les accompagner avec leur famille à toutes les étapes de la maladie. Reportage. sciav.fr/945enfant

Le top 5 du mois

- **L'incroyable sauvetage d'un sous-marin de la Première Guerre mondiale**
  sciav.fr/945soum
- **Le mystère clinique de la morsure des mambas élucidé**
  sciav.fr/945mamba
- **Où était située votre ville à l'époque des dinosaures ?**
  sciav.fr/945carte
- **L'éjaculation est bien plus complexe qu'on ne le pensait**
  sciav.fr/945masc
- **L'Europe s'alarme d'un champignon multirésistant dans les hôpitaux**
  sciav.fr/945champi

A. CONIGLI / ESA

ENTRETIEN

Arnaud Prost ou le quotidien d'un astronaute de réserve

Pilote de chasse, plongeur professionnel, ingénieur et… astronaute remplaçant ! Âgé de 32 ans, Arnaud Prost a été sélectionné parmi plus de 22 000 candidats pour être membre de la réserve à l'Agence spatiale européenne (ESA) où il se forme à partir dans l'espace, un jour peut-être. Rencontre en vidéo avec ce passionné d'astrophysique. sciav.fr/945prost

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX

LinkedIn

Une opération exceptionnelle réalisée au CHU de Montpellier a permis à un patient de recouvrer la vue grâce à une bioprothèse conçue à partir d'un morceau de dent et de Plexiglas.
sciav.fr/945chir

Instagram

C'est un problème méconnu : la douleur des femmes est souvent perçue comme moins grave que celle des hommes, ce qui peut avoir des conséquences sur leur prise en charge.
sciav.fr/945douleur

Facebook

Une étude révèle la forte influence de la migration des bisons sur la biodiversité du parc de Yellowstone (États-Unis). Un argument de plus pour permettre la conservation de cette espèce.
sciav.fr/945bison

LABORATOIRES ILAPHARM
ilapharm.com

Des solutions santé naturelle adaptées pour vous !

"Les produits des Laboratoires ILAPHARM me conviennent tout à fait, ils sont efficaces."
Avis vérifiés Juin 2025 - Rita M. ★★★★★

OFFRE DÉCOUVERTE
TOUT À 7€*

**Offre valable 2 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Retrouvez, sur le bon de commande, la quantité recommandée par nos experts pour une efficacité optimale de nos produits !

ARTICULATIONS
- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpago-phytum *(1)*

45 gélules
Durée : 15 jours

MINCEUR
- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal !

(1), (2), (7), (16)

45 gélules
Durée : 15 jours

DRAINEUR
- En cas de mauvaise élimination de l'eau par l'organisme
- Action drainante

(17)

45 gélules
Durée : 22 jours

CAPITAL-VISION
- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle *(11)*

10 ampoules
Durée : 10 jours
~~20,50€~~

JAMBES LOURDES
- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules
Durée : 15 jours

SEXUALITÉ
- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca !

(3)

20 gélules
Durée : 10 jours

STRESS
- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

*Allergène : **poisson**. (4)*

45 gélules
Durée : 22 jours

IMMUNITÉ
- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année !

(3), (8)

45 gélules
Durée : 15 jours

SOMMEIL
- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules
Durée : 22 jours

PROSTATE
- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules
Durée : 22 jours

CHOLESTÉROL
- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire

(10), (12)

30 gélules
Durée : 10 jours

CAPTEUR DE GRAISSES
- Association brevetée de fibres alimentaires
- Idéal avec le Guarana !

45 gélules
Durée : 8 jours

LIBIDO
- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran !

45 comprimés
Durée : 15 jours

FOIE - DRAINEUR
- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie

(7), (8), (9)

10 ampoules
Durée : 5 jours
~~17,70€~~

OS & ARTICULATIONS
- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

45 gélules
Durée : 15 jours

DIGESTION
- Ballonnement et flatulences
- Soulagement rapide

(3), (18)

45 gélules
Durée : 11 jours

Produits déconseillés aux moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Contient de la caféine (50 mg max par jour). (2) Ne convient pas aux insuffisants rénaux. (3) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (4) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (5) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (6) Déconseillé en cas de troubles cardiaques. (7) Déconseillé chez les personnes sous traitement antidiabétique. (8) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. (9) Déconseillé en cas d'allergie aux Asteraceae. (10) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (11) Ne pas associer avec des anticoagulants. (12) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (13) Déconseillé en cas d'opération chirurgicale. (14) Déconseillé aux personnes épileptiques. (15) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (16) En cas de troubles digestifs consultez votre médecin avant consommation. (17) Déconseillé en cas d'insuffisance cardiaque ou rénale œdémateuses. (18) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits. Grand Agenda 2026 : L150 x H212 x Ep.15 mm - Matières : PU - Polyester - Papier.

VOS CADEAUX

Le Grand Agenda 2026

OFFERT Dès 20€ d'achat

0€ Livraison
Dès 25€ d'achat
Au lieu de ~~6,50€~~

Commandez sur :
ilapharm.com

2ème CADEAU OFFERT
Dès 30€ d'achat

COMMANDEZ SUR :
ilapharm.com
ou avec votre smartphone

CODE PRIVILÈGE :
CB586

OFFRE DÉCOUVERTE - SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

@ **ilapharm.com**
Possibilité de régler par chèque

ILAPHARM chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard - 35230
NOYAL - CHÂTILLON-SUR-SEICHE

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi
9h -13h et 14h -18h

COORDONNÉES ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
.....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail : .....
Pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

MODE DE PAIEMENT

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :**
○ débit immédiat
○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

GARANTIES

SATISFAIT OU GARANTIE 1 MOIS REMBOURSÉ

PAYEZ DANS 1 MOIS
Envoyez votre **règlement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.

Charte Qualité Fevad · synadiet · La Poste 72h

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38112 €, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité du cadeau, il sera remplacé par un autre d'une valeur similaire. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits du Règlement européen sur la protection des données, écrivez-nous ou voir nos C.G.V sur notre site ilapharm.com/condition-generales-de-vente. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés (détails articles L.217-4 et suivants du Code de la consommation). Délai de rétractation : 30 jours après livraison de votre commande, pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitement de la commande : 48h suivant sa réception, livraison après 72h d'acheminement environ. Nous adhérons à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages et papiers : FR202486_01JWKA, Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, www.mangerbouger.fr. Cochez la case, pour ne pas recevoir nos offres ☐, celles de nos partenaires ☐, ou écrivez-nous.

Quantité RECOMMANDÉE pour une CURE COMPLÈTE

NOM DU PRODUIT	RÉF.		QTÉ	PRIX UNITAIRE	TOTAL
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45	x4		7€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45	x4		7€	
DRAINEUR - Cassis BIO	PCAB45	x3		7€	
VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB	x3		7€	
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45	x4		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20	x4		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45	x3		7€	
IMMUNITÉ - Échinacéa BIO	PECB45	x3		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45	x4		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45	x2		7€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30	x4		7€	
CAPTEUR DE GRAISSES - Nopal BIO	PNOB45	x3		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45	x4		7€	
DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB	x3		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSV45	x4		7€	
DIGESTION - Charbon Fenouil BIO	PCFB45	x4		7€	
☐ Ma commande atteint 20€, je reçois mon **GRAND AGENDA 2026**					**OFFERT**
☐ Ma commande atteint 25€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**					**OFFERTE**
☐ Ma commande est inférieure à 25€, **je rajoute 6,50€ de livraison**					
Code Privilège : **CB586**				**TOTAL À RÉGLER**	..... €

NOUVELLE JEEP® AVENGER 4xe THE NORTH FACE EDITION

GAMME AVENGER À PARTIR DE 199 €/MOIS(1)

LLD 49 MOIS – 1ER LOYER DE 2 700 € – PRIME CERTINERGY DE 4 750 € DÉDUITE(2)

DISPONIBLE EN MOTORISATIONS 100 % ÉLECTRIQUE, HYBRIDE 2 ET 4 ROUES MOTRICES OU ESSENCE

Jeep®

THE NORTH FACE

A
B
C 122 g CO_2/km
D
E
F
G

(1) Avenger Longitude électrique neuve, sans option, au tarif du 01/10/2025, en location longue durée sur 49 mois/40 000 km max., soit 48 loyers mensuels de 199 €, après un **1er loyer de 2 700 €**, déduction faite de la Prime CertiNergy de 4 750 € (conditions d'éligibilité sur www.jeep.fr). (2) Prime CertiNergy pour la valorisation des opérations au titre du dispositif des Certificats d'Économie d'Énergie, non soumise à la TVA (n° SIREN : 798 641 999). Offre non cumulable, réservée aux particuliers, **valable pour toute commande jusqu'au 30/11/2025** et livraison/immatriculation avant la fin du mois en cours, dans le réseau Jeep® participant, dans la limite des stocks disponibles. Sous réserve d'acceptation de votre dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138 517 008 €, RCS Versailles n° 317 425 981, ORIAS n° 07004921 (www.orias.fr), n° ADEME : FR231747_03GHJZ, 43 rue Jean-Pierre Timbaud 78300 Poissy. **Garantie spéciale Jeep® Care jusqu'à 8 ans : voir conditions sur www.jeep.fr. Modèle présenté** : Avenger The North Face Edition 1.2 Turbo T3 145 ch BVR6 4xe avec option : **359 €**, 1er loyer de 3 900 €. **Avenger Électrique : consommation (kWh/100 km) : 16,0 - 15,5 ; émissions de CO_2 (g/km) : 0 ; autonomie (km) : 400 - 386. Avenger 4xe : consommation (l/100 km) : 5,4 ; émissions de CO_2 (g/km) : 123 - 122.**

Pensez à covoiturer #SeDéplacerMoinsPolluer